ИЗВЕСТИЯ

Волгоградского государственного технического университета

ISSN 1990-5297

Серия

Прогрессивные технологии в машиностроении

№ 1 (248)
2021

16+

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

Редакционная коллегия:

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

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

Чигиринский Ю. Л., д.т.н., доц.

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. (ВПИ, филиал ВолгГТУ, г. Волжский)

Сидякин Ю. И., д.т.н., проф.

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

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

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

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

Плотников А. Л., д.т.н., проф.

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

Международный индекс журнала ISSN 1990-5297.

Журнал распространяется по подписке.
Индекс журнала по каталогу Агентства «Роспечать» для Российской Федерации – 80811(ОК+ЭК).

Тел. издательства ВолгГТУ:
8-(8442) 24-84-08
8-(8442) 24-84-05
zavrio@vstu.ru

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

№ 1 (248) Январь 2021

УЧРЕДИТЕЛЬ:
ФГБОУ высшего образования
«Волгоградский государственный технический университет»

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

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

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

Печатается по решению редакционно-издательского совета Волгоградского государственного технического университета

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

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

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

© Волгоградский государственный технический университет,
«Известия Волгоградского государственного технического университета», 2021

Head Editor of the scientific journal “Izvestiya VSTU”:
Novakov I. A. – Academician of RAS, Prof., Doctor of Chemistry, President of VSTU

Editorial board:

Baiburin V. B., D. Sc. (Physical and Mathematical Sciences), Prof., Academician of RANS, Honored Scientist of the Russian Federation, State Technical University of Saratov (Saratov, Russia)
Bezyazychny V. F., D. Sc. (Engineering), Prof., Rybinsk State Aviation Technical University named after P.A. Solovyov (Rybinsk, Russia)
Bodrov V. N., D. Sc., Prof., University of Applied Sciences (Berlin, Germany)
Brebels A., PhD, Associate Prof., Faculty of Engineering Science of University of Leuven (Leuven, Belgium)
Burenin A. A., Corresponding Member of RAS, Institute of Machinery and Metallurgy of the FEB RAS (Komsomolsk-on-Amur, Russia)
Golovanchikov A. B., D. Sc. (Engineering), Prof. of VSTU
Grinberg B. A., D. Sc. (Physical and Mathematical Sciences), Institute of Metal Physics, Ural Division of RAS (Ekaterinburg, Russia)
Gurevich L. M., D. Sc. (Engineering), Associate Prof. of VSTU
Dobrushin L. D., D. Sc. (Engineering), E.O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine (Kiev, Ukraine)
Zlotin S. G., D. Sc. (Chemistry), Prof., N.D. Zelinsky Institute of Organic Chemistry Russian Academy of Sciences (Moscow, Russia)
Ivanov A. M., D. Sc. (Engineering), Prof., Moscow Automobile and Road Construction University (MADI) (Moscow, Russia)
Ivashchenko N. A., D. Sc. (Engineering), Prof., Honored Scientist of the Russian Federation, Bauman Moscow State Technical University (Moscow, Russia)
Korolev A. V., D. Sc., Prof., State Technical University of Saratov (Saratov, Russia)
Kuzmin S.V., D. Sc. (Engineering), Prof. of VSTU
Kurayev A. A., D. Sc. (Physical and Mathematical Sciences), Prof., Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (BSUIR) (Minsk, Republic of Belarus)
Lysak V. I., Corresponding Member of RAS, Honored Scientist of the Russian Federation, D. Sc. (Engineering), Prof. of VSTU
Le Kvet Tan, PhD, Kanto University (Kanto, Vietnam)
Markov V. A., D. Sc. (Engineering), Prof., Bauman Moscow State Technical University (Moscow, Russia)
Merten K., D. Sc. (Engineering), Prof., Institute of Chemical Process Engineering (Stuttgart, Germany)
Navrotskiy A. V., D. Sc. (Chemistry), Prof. of VSTU
Nizhegorodtsev R. M., D. Sc. (Economy), Institute of Control Sciences V. A. Trapeznikov Academy of Sciences (Moscow, Russia)
Pai V. V., D. Sc. (Physical and Mathematical Sciences), Lavrentyev Institute of Hydrodynamics of SB RAS (Novosibirsk, Russia)
Polyanchikov Yu. N., D. Sc. (Engineering), Prof. of VSTU
Pustovoit V. N., D. Sc. (Engineering), Prof., Honored Scientist of the Russian Federation, Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russia)
Rusinov V. L., Corresponding Member of RAS, Institute of Chemical Technology of Ural Federal University (Ekaterinburg, Russia)
Rybin V. V., Corresponding Member of RAS, D. Sc. (Physical and Mathematical Sciences), Prof., St. Petersburg Polytechnic University (St.Petersburg, Russia)
Truel J.-L., D. Sc. (Economy), Prof., University Paris Est Créteil, Sorbonne, France, Vice-president of International economists club «Kondratiev Circle»
Fedyanov E. A., D. Sc. (Engineering), Prof. of VSTU
Frolov V. A., D. Sc. (Engineering), Prof., «MATI Russian State Technological University named after K.E. Tsiolkovsky” (Moscow, Russia)
Sharipov V. M., D. Sc. (Engineering), Prof., Moscow State Technical University “ MAMI” (Moscow, Russia)
Shakhovskaya L. S., D. Sc. (Economy), Prof. of VSTU
Shcherbakov M. V., D. Sc. (Engineering), Prof. VSTU
Sheyin A. G., D. Sc. (Physical and Mathematical Sciences), Prof. of VSTU

SERIES
«ADVANCED
TECHNOLOGY IN
MACHINE BUILDING»

IZVESTIA

VOLGOGRAD STATE TECHNICAL UNIVERSITY

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

Editorial board:
Chairman

Tchigirinsky Ju. L., D. Sc. (Engineering), Ass. Prof.
Serdobintsev Yu.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., (VPI of VSTU, Volzhski)
Sidyakin Yu.I., D. Sc. (Engineering), Prof.
Blagoveschenskaya M.M., D. Sc. (Engineering), Prof., Vice-rector (MSUFP, Moscow)
Pashkov E.V., D. Sc. (Engineering), Prof., First vice-rector (SEVNTU, Sevastopol)
Popov V.I., D. Sc. (Engineering), Prof. (MSUAB, Moscow)
Serdobintsev S.P., D. Sc. (Engineering), Prof. (KSTU, Kaliningrad)
Plotnikov A.L., D. Sc. (Engineering), Prof.
Frolov E.M. (executive secretary), Cand. Sc., Ass. Prof.

International index of the journal ISSN 1990-5297.

The journal is distributed by subscription. Index of the journal in the catalogue of the Agency «Rospechat» for the Russian Federation – 80811(ОК+ЭК).
.

Tel. Of VSTU editorial office:
8-(8442) 24-84-08
8-(8442) 24-84-05
zavrio@vstu.ru

Scientific journal
Published since January 2004
12 times a year

№ 1 (248) January 2021

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

© Volgograd State Technical University, «Izvestia VSTU», 2021

АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ

Авдеев Н. В. *45*
Алехин А. Г. *47*
Аралов Г. М. *60*
Аржуханов Р. И. *12*
Банников А. И. *7, 9*
Барабанов В. Г. *63, 73*
Буза М. Н. *47*
Бутусов Н. О. *47*
Ваганов А. В. *50, 57*
Васильев В. В. *23*
Васильев П. С. *73*
Волков И. В. *52*
Воронин А. С. *47*
Галсанова Э. Ц. *54*
Даниленко М. В. *23*
Дьяченко Е. А. *50, 57*
Евтюнин А. В. *41*
Жданов А. А. *12*
Зейналов Д. Р. *9*
Ингеманссон А. Р. *15*
Каландаров П. И. *60*
Калинин Я. В. *52, 54*
Карпов В. Г. *27*
Ковалёв А. А. *7*
Кожевникова А. А. *19*
Козенко М. Ю. *57*
Козловцева Н. В. *63*
Крайнев Д. В. *31*
Крылов Д. М. *63*
Крылов Е. Г. *45, 63*
Кузнецов С. П. *27*
Кухтик М. П. *67*
Макаров А. М. *50, 57, 60*
Макарова О. А. *7, 9*
Малолетов А. В. *50*
Нелюбова А. В. *76*
Носенко В. А. *23, 27*
Овчинников Г. Н. *69*
Осипов А. Д. *7*
Панюлайтис А. С. *73*
Плотников А. Л. *12*
Поступаева С. Г. *80*
Прокудин Г. Ю. *76*
Репников А. И. *67*
Рогачев А. В. *38*
Сакерин С. И. *45*
Санинский В. А. *34*
Семеняка С. С. *38*
Сердобинцев Ю. П. *67*
Сурганов Н. А. *52*
Тихонова Ж. С. *12, 31*
Ушаков Н. А. *34*
Фадеев В. Г. *38*
Федорова Н. В. *80*
Федянов Е. А. *34*
Фетисов А. В. *27*
Фролов Е. М. *31, 38*
Харламов В. О. *41*
Хаустов М. А. *67*
Чемогонов П. А. *31*
Чигиринский Ю. Л. *41*
Шабанов С. Н. *52*
Шаронов Н. Г. *76*
Шатилов А. С. *45*
Шведуненко А. А. *19*
Шкурин И. К. *9*
Шостенко С. В. *69*
Яковлев А. А. *80*

СОДЕРЖАНИЕ

Часть 1. ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ

Банников А. И., Макарова О. А., Ковалёв А. А., Осипов А. Д.
Исследование геометрических параметров заусенцев на торце трубы при пакетной резке холодного металлопроката..... 7

Банников А. И., Макарова О. А., Шкурин И. К., Зейналов Д. Р.
Влияние резонанса на деформацию зубьев пил пакетной резки..... 9

Жданов А. А., Плотников А. Л., Тихонова Ж. С., Аржуханов Р. И.
Анализ причин ошибок при расчете погрешностей из-за упругих перемещений элементов технологической системы при токарной обработке..... 12

Ингеманссон А. Р.
Основные положения методологии технологической подготовки производства и адаптивного управления в цифровых производственных системах для механической обработки..... 15

Кожевникова А. А., Шведуненко А. А.
Альтернативные методы изготовления зубчатого колеса планетарного редуктора с внутренним зацеплением..... 19

Носенко В. А., Даниленко М. В., Васильев В. В.
Методика определения характера распределения контактирующих вершин зерен на поверхности шлифовального круга с учетом многопроходности процесса…….. 23

Носенко В. А., Фетисов А. В., Кузнецов С. П., Карпов В. Г.
Состояние обработанной поверхности сплава на основе ниобия при шлифовании кругом из карбида кремния..... 27

Тихонова Ж. С., Чемогонов П. А., Фролов Е. М., Крайнев Д. В.
Система адаптивного управления процессом механической обработки..... 31

Федянов Е. А., Санинский В. А., Ушаков Н. А.
Расчет параметров дросселирования в параллельных каналах дорнующих прошивок для глубоких отверстий..... 34

Фролов Е. М., Рогачев А. В., Фадеев В. Г., Семеняка С. С.
Адаптация метода управления режимами резания к промышленным условиям..... 38

Чигиринский Ю. Л., Евтюнин А. В., Харламов В. О.
Количественная оценка стабильности процессов механической обработки..... 41

Часть 2. АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

Авдеев Н. В., Сакерин С. И., Шатилов А. С., Крылов Е. Г.
Разработка математической модели процесса очистки водных источников на базе электроразрядной установки……..... 45

Буза М. Н., Бутусов Н. О., Воронин А. С., Алехин А. Г.
Оценка и выбор метода реализации системы управления натяжением проволоки в вырезных электроэрозионных станках..... 47

Ваганов А. В., Макаров А. М., Малолетов А. В., Дьяченко Е. А.
Исследование удельного времени 3D печати..... 50

Волков И. В., Калинин Я. В., Сурганов Н. А., Шабанов С. Н.
Обзор стыковочных устройств устройств
колено-шагающей платформы для агроробота……..……..…. 52

Галсанова Э. Ц., Калинин Я. В.
Определение температурных напряжений
при нагреве тонких листовых заготовок……..... 54

Дьяченко Е. А., Козенко М. Ю., Макаров А. М., Ваганов А. В.
Анализ существующих кинематик 3D принтеров технологии FFF/FDM..... 57

Каландаров П. И., Макаров А. М., Аралов Г. М.
Особенности автоматизированного измерения влажности
зерновых культур в полевых условиях..... 60

Крылов Д. М., Барабанов В. Г., Крылов Е. Г., Козловцева Н. В.
Разработка дистанционной системы управления
роботом-манипулятором с пятью степенями свободы..... 63

Кухтик М. П., Репников А. И., Сердобинцев Ю. П., Хаустов М. А.
Автоматизированная система предотвращения аварийных ситуаций
в опоре скольжения газоперекачивающего агрегата..... 67

Овчинников Г. Н., Шостенко С. В.
Исследование струйных первичных преобразователей
положения стыка при проведении сварки тонкостенных изделий..... 69

Панюлайтис А. С., Барабанов В. Г., Васильев П. С.
Автоматизированное устройство испарительного охлаждения
методических печей с использованием гидравлических форсунок..... 73

Прокудин Г. Ю., Нелюбова А. В., Шаронов Н. Г.
Повышение производительности установок для литья реактопластов
посредством внедрения нагревающихся литьевых форм..... 76

Яковлев А. А., Федорова Н. В., Поступаева С. Г.
Поисковое конструирование технологических лазеров
на углекислом газе на основе новой информационной модели
физического принципа действия..... 80

К сведению авторов……... 84

ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ

УДК 621.9
DOI: 10.35211/1990-5297-2021-1-248-7-9

А. И. Банников, О. А. Макарова, А. А. Ковалев, А. Д. Осипов

ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЗАУСЕНЦЕВ НА ТОРЦЕ ТРУБЫ ПРИ ПАКЕТНОЙ РЕЗКЕ ХОЛОДНОГО МЕТАЛЛОПРОКАТА

Волгоградский государственный технический университет
E-mail: makar0vaolga@rambler.ru

В настоящей публикации рассматривается вопрос, связанный с исследованием геометрических параметров заусенцев на торце трубы при пакетной резке холодного металлопроката дисковыми пилами.

Ключевые слова: дисковые пилы, пакет труб, пакетная резка, заусенец, торец трубы.

A. I. Bannikov, O. A. Makarova, A. A. Kovalyov, A. D. Osipov

INVESTIGATION OF GEOMETRIC PARAMETERS OF BURRS ON THE PIPE END DURING BATCH CUTTING OF COLD ROLLED METAL

Volgograd State Technical University

This publication discusses the issue related to the study of geometric parameters of burrs on the end of the pipe during batch cutting of cold rolled metal with disk saws.

Keywords: disk saw, pipe bundle (batch), batch saw cutting, burr, the end of a pipe.

Данная работа посвящена исследованию геометрических параметров заусенцев на торце трубы при пакетной резке холодного металлопроката дисковыми пилами в ТПЦ–2 АО ВТЗ. В работе описана математическая модель, позволяющая прогнозировать геометрические параметры заусенцев, в зависимости от кинематических и тепловых характеристик процесса резания.

Заусенцы на торцах труб при резании возникают вследствие пластического течения металла под действием усилий резания и высоких температур. Возникновение заусенцев является общей проблемой при разрезании холодного и горячего металлопроката дисковыми пилами на металлургических предприятиях. В работах А. И. Банникова [1, 2] рассмотрено образование заусенца при термофрикционном резании горячего трубопроката и предложены меры улучшения качества торца.

При разрезании пакета заготовок выделяется большое количество тепла от трения, что приводит к нагреву значительного объема обрабатываемого материала в приконтактной зоне. При подходе пилы к краю трубы в конце резания, этот нагретый объем материала сначала деформируется, а затем разрывается с образованием заусенца на торце трубы.

Заусенец имеет размеры $l_з \times B_з \times h_з$, которые определяются как размерами заготовки, так и силовыми и температурными параметрами процесса резания.

Ширина заусенца $B_з$ увеличивается из-за растягивания материала по боковым краям пилы до толщины y:

$$B_з = B\frac{z}{y} \quad (1)$$

Длину заусенца можно определить из геометрических параметров заготовки. Разрезав половину диаметра, пила отрывает слой материала толщиной $h_з$ и отгибает его, формируя заусенец до момента его полного отрыва.

$$l_з = \frac{\pi d_{тр}}{2}, \quad (2)$$

где $d_{тр}$ – диаметр разрезаемых труб, м.

© Банников А. И., Макарова О. А., Ковалев А. А, Осипов А. Д., 2021.

В табл. 1 представлены геометрические параметры заусенца полученные при теоретических расчетах.

Для оценки экспериментальных данных качества торцов заготовок после резания дисковой пилой использовались такие критерии, как сечение заусенца и длина заусенца.

Таблица 1

Длина, ширина и толщина заусенца, полученные расчетом температурных полей, мм

Диаметр	$l_з$	$B_з$	$h_з$
Ø42	66	10,21	0,98
Ø140	220	10,18	1,02

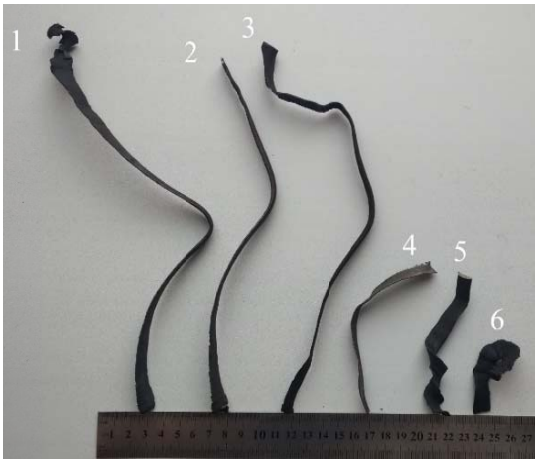


Рис. 1. Общий вид заусенцев

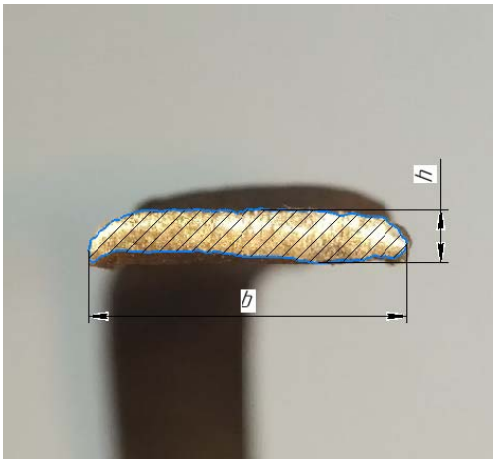


Рис. 2. Сечение заусенца

Измерения толщины и ширины заусенцев проводились с помощью электронного штангенциркуля (цена деления 0,01 мм; предельная погрешность измерений 20 мкм) при температуре заготовки, равной температуре окружающей среды цеха: 20…25 °С, для каждой десятой заготовки.

Замеры производились по три раза в трех сечениях, затем высчитывался средний по трем замерам результат.

Таблица 2

Длина, ширина и толщина заусенца, полученные экспериментально, мм

Диаметр	$l_з$	$B_з$	$h_з$
Ø42	75	10,64	1,05
Ø140	232	10,89	1,07

Полученная при испытаниях величина заусенца отличалась не более чем на 5–8 % от теоретической (рис. 2, 3).

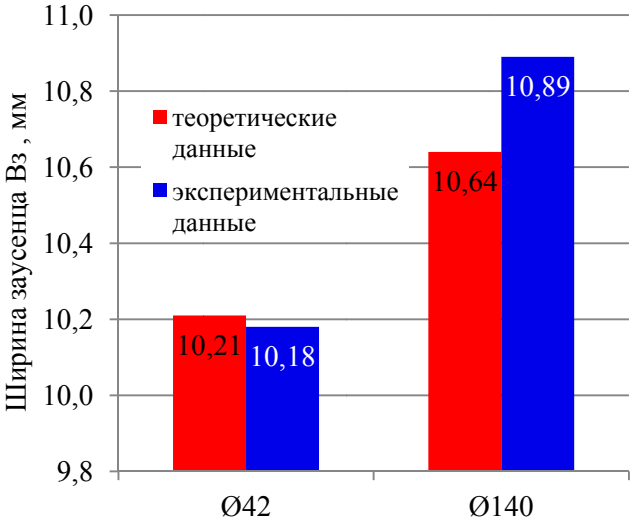


Рис. 3. Ширина заусенца: $B_з$ – экспериментальные и теоретические данные для труб Ø42 и 140 мм

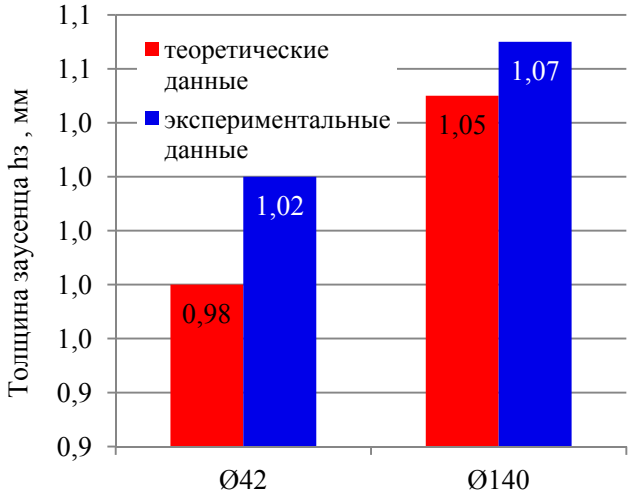


Рис. 4. Толщина заусенца: $h_з$ – экспериментальные и теоретические данные для труб Ø42 и 140 мм

На основании этого, можно сделать вывод о адекватности предложенной математической модели для расчета геометрических параметров заусенца при пакетной резке холодного металлопроката дисковыми пилами.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Повышение эффективности термофрикционной резки трубопроката / А. И. Банников, А. А. Банников, А. И. Курченко, Н. А. Дятлов, И. Л. Пермяков // СТИН. – 2010. – № 10. – С. 34–37.

2. Исследование размеров заусенца при термофрикционном резании / Ю.Н. Полянчиков, А. И. Банников, А. И. Курченко, О. А. Макарова // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 9 / ВолгГТУ. – Волгоград, 2008. – (Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении» ; вып. 4). – С. 33–35.

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

4. *Коновалов, А. В.* Теория сварочных процессов / А. В. Коновалов [и др.]. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана. – 2007.

5. *Неумоина, Н. Г.* Тепловые процессы в технологической системе резания : учеб. пособие / Н. Г. Неумоина, А. В. Белов ; ВолгГТУ. – Волгоград, 2006. – 84 с.

6. *Чиркин, В. С.* Теплофизические свойства материалов / В. С. Чиркин. – Рипол Классик, 2013.

УДК 621.9
DOI: 10.35211/1990-5297-2021-1-248-9-12

А. И. Банников, О. А. Макарова, И. К. Шкурин, Д. Р. Зейналов

ВЛИЯНИЕ РЕЗОНАНСА НА ДЕФОРМАЦИЮ ЗУБЬЕВ ПИЛ ПАКЕТНОЙ РЕЗКИ

Волгоградский государственный технический университет
E-mail: makar0vaolga@rambler.ru

Рассмотрен процесс возникновения резонанса при резании пилой пакетной резки металлопроката, посчитаны вынужденные и свободные колебания пилы пакетной резки.

Ключевые слова: пила пакетной резки, высокоскоростное резание, резонансные колебания.

A. I. Bannikov, O. A. Makarova, I. K. Shkurin, D. R. Zeynalov

THE INFLUENCE OF RESONANCE ON THE DEFORMATION OF THE TOOTHS OF BUNDLED CUTTING SAWS

Volgograd State Technical University

The process of the occurrence of resonance when cutting with a saw to cut metal rolling is considered, the forced and free vibrations of the saw of batch cutting are calculated.

Keywords: Batch saw, high speed cutting, resonant vibrations.

© Банников А. И., Макарова О. А., Шкурин И. К., Зейналов Д. Р., 2021.

Процесс высокоскоростной резки горячего и холодного проката пильными дисками широко применяется в современном производстве на металлургических предприятиях. Наряду с высокой производительностью и сравнительно простой технологической реализацией этот процесс сопровождается значительным износом инструмента [1].

В данной статье речь пойдет об анализе проблем износа пилы при резании пакета труб салазковой пилой в Трубопрокатном цехе № 2 (ТПЦ–2) АО ВТЗ. Процесс резания реализуется при скоростях 105 м/с, дисковой пилой с зубьями $z = 400$, диаметр пилы 2000 мм, частота вращения пилы 16,6 об/с.

В процессе резания была обнаружена проблема неравномерного износа зубьев пилы. Наблюдаются большие неравномерные деформации зубьев как по направлению вращения диска, так и против него. Катастрофичекий износ зубьев сопровождается потерей геометрии режущего клина и заполнением впадин между зубьями обрабатываемым материалом.

Харктерной особенностью является то, что износ происходит с чередованием нескольких зубьев, пример данной проблемы изображен на рисунке.

Фотография сегмента пилы

Процесс неравномерной деформации зубьев может быть связан с появлением вибраций и возникновением резонанса.

При резонансе резко возрастает амплитуда вынужденных колебаний (происходит наиболее полная передача энергии от одной колебательной системы к другой). Резонанс наблюдается, когда частота собственных колебаний совпадает, либо имеет схожие значения с вынужденной частотой [2].

Толщина пильного диска намного меньше его диметра, потому пила имеет малую жесткость и под действием нагрузки может подвергаться воздействию вибраций. Колебания диска пилы как упругого тела имеют бесчисленное множество собственных форм и частот [2]. Форма этих колебаний определяется числом узловых диаметров m и узловых окружностей n. Каждой форме собственных колебаний соответствует строго определенная частота колебаний.

В работе [3] экспериментально исследованы колебания тонкого диска постоянной толщины, жестко закрепленного в центре.

Запишем формулу нахождения частоты собственных колебаний f_0 диска [2], с$^{-1}$:

$$f_0 = \frac{k_{mn}}{D_{фр}^{\ 2}} \cdot \sqrt{\frac{4E \cdot B^2}{3\rho\left(1-\mu^2\right)}}\ , \qquad (1)$$

где k_{mn} – коэффициент из табл. 1, зависящий от формы колебаний [3]; $D_{фр}$ – диаметр пилы, $D_{фр} = 2$ м; B – толщина диска пилы, $B = 0{,}008$ м; ρ –плотность материала диска пилы, $\rho = 7800$ кг/м^3; μ – коэффициент Пуассона, $\mu = 0{,}28$; E – модуль упругости материала диска пилы, $E = 2{,}1 \cdot 10^{11}$ Па.

Таблица 1

Значение коэффициента k_{mn}

n *	m*			
	0	1	2	3
0	3,81	20,51	61,54	121,12
1	2,07	23,14	64,54	128,3
2	5,48	34,49	84,21	152,44
3	11,03	51,76	109,55	187,51
4	17,18	68,79	136,45	221,65
5	27,97	91,31	172,97	263,8

*n – число узловых окружностей; m – число узловых диаметров

Вращение пилы увеличивает частоту собственных колебаний, с$^{-1}$:

$$f_n = \sqrt{f_0^2 + k_\omega \cdot n_{фр}^2}\ , \qquad (2)$$

где f_0 – частота собственных колебаний; k_ω – коэффициент из табл. 2; $n_{фр}$ – частота вращения пилы, $n_{фр} = 16{,}6/2\pi = 2{,}65$ с$^{-1}$.

Таблица 2

Значения коэффициента k_ω

m	0	1	2	3
k_ω	0	1	2,35	4,05

Полученные экспериментально формы колебаний диска систематизированы по мере возрастания количества узловых окружностей m и узловых диаметров n.

Полученные результаты частоты собственных колебаний, которые зависят от числа узловых окружностей m и узловых диаметров n, запишем в табл. 5 и 6.

Таблица 3

Значения собственных колебаний диска f_n, c^{-1}

n	m			
	0	1	2	3
0	47,6	256,0	768,2	1511,8
1	26,0	288,8	805,6	1601,5
2	68,5	430,5	1051,1	1902,8
3	137,7	646,1	1367,4	2340,5
4	214,5	858,7	1703,2	2766,7
5	349,1	1139,8	2159,0	3292,8

Вынужденными колебаниями называется движение колебательной системы под действием внешней периодической силы и происходящие в такт с изменением этой силы.

Вынужденные колебания, вызванные ударами при входе зубьев пилы в зону резания, имеют частоту f_z :

$$f_z = n_{фр} \cdot z = 2,65 \cdot 400 = 1061,15, \qquad (3)$$

Частота вынужденных колебаний будет также зависеть от всех целых чисел z_i, для которых число зубьев пилы 400 является кратным.

$$f_{Zi} = \frac{f_z}{z_i}, \qquad (4)$$

где f_{Zi} – частота вынужденных колебаний, для z_i зубьев; z_i – числа кратности, z_i = 1, 2, 4, 5, 8, ... $f_{Zi(2)}$ – для частоты собственных колебаний.

Запишем результаты для всех z_i в табл. 4. Для рассчитанных по формуле (4) частот вынужденных колебаний, подберем ближайшие собственные частоты из табл. 3.

Жирным шрифтом в табл. 4 выделены максимально близкие друг к другу значения ($0,7>f_{Zi}/f_n>1,3$), при которых возможно возникновение явления резонанса. Наиболее опасными будут частоты вхождения $4^{-го}$, $5^{-го}$, $8^{-го}$, $16^{-го}$ и $40^{-го}$ зуба пилы.

Таблица 4

Значения собственных f_n и вынужденных f_{Zi} частот колебаний

z_i		f_{Zi}	f_n	f_{Zi}/f_n
z_1	1	**1061,15**	**1051,1**	**1,01**
z_2	2	**530,57**	**430,5**	**1,23**
z_4	4	**265,28**	**256,0**	**1,04**
z_5	5	**212,23**	**214,5**	**0,99**
z_8	8	**132,64**	**137,7**	**0,96**
z_{10}	10	**106,1**	**137,7**	**0,77**
z_{16}	16	**66,3**	**68,5**	**0,97**
z_{20}	20	**53,1**	**47,6**	**1,12**
z_{25}	25	**42,4**	**47,6**	**0,89**
z_{40}	40	**26,5**	**26,0**	**1,02**
z_{50}	50	**21,2**	**26,0**	**0,82**
z_{80}	80	13,3	26,0	0,51
z_{100}	100	10,6	26,0	0,41
z_{200}	200	5,3	26,0	0,20
z_{400}	400	2,7	26,0	0,10

Для выхода из зоны резонанса ($0{,}7>f_{Zi}/f_n>1{,}3$), необходимо что бы количество зубьев было меньше 374 или больше 696.

Проведенный анализ позволяет сделать вывод, что при проектировании дисковых пил высокоскоростного резания необходимо проводить расчет собственных и вынужденных частот инструмента, для исключения явлений резонанса.

Выводы:

1. Для предотвращения явления резонанса необходимо изменить количество зубьев пилы, чтобы исключить кратность, и попадание в резонансную зону.

2. Управлять частотой вращения пилы, это позволит продлить срок эксплуатации пилы, при этом, не ухудшая ее технических характеристик.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Банников, А. И.* Теоретические основы модернизации термофрикционных пил для резки горячего трубопроката : монография / А. И. Банников ; ВолгГТУ. – Волгоград, 2014. – 135 с.

2. *Бабаков, И. М.* Теория колебаний / И. М. Бабаков. – М. : Наука, 1965. – 560 с.

3. *Макаева, Р. Х.* Исследование резонансных колебаний дисков с применением голографической интерферометрии / Р. Х. Макаева, А. Х. Каримов, А. М. Царева // Вісник двигунобудування. – 2012. – №. 2.

УДК 621.941
DOI: 10.35211/1990-5297-2021-1-248-12-15

А. А. Жданов, А. Л. Плотников, Ж. С. Тихонова, Р. И. Аржуханов

АНАЛИЗ ПРИЧИН ОШИБОК ПРИ РАСЧЕТЕ ПОГРЕШНОСТЕЙ ИЗ-ЗА УПРУГИХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ЭЛЕМЕНТОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ПРИ ТОКАРНОЙ ОБРАБОТКЕ

Волгоградский государственный технический университет
E-mail: alex_128@mail.ru

Рассматриваются вопросы, связанные с достоверностью результатов расчета погрешностей токарной обработки деталей типа «вал» из-за упругих перемещений элементов технологической системы по традиционным справочным моделям.

Ключевые слова: погрешности обработки, динамическая жесткость, статическая жесткость, радиальная составляющая силы резания.

A. A. Zhdanov, A. L. Plotnikov, Zh. S. Tikhonova, R. I. Arzhukhanov

ANALYSIS OF THE CALCULATING ERRORS DUE TO ELASTIC MOVEMENTS OF TECHNOLOGICAL SYSTEM ELEMENTS DURING TURNING

Volgograd State Technical University

The issues of reliability of the results of calculating the error of turning parts of the "shaft" type due to the elastic displacements of the technological system elements according to traditional reference models are considered.

Keywords: processing errors, dynamic stiffness, static stiffness, radial component of the cutting force.

Современные машиностроительные станки, особенно прецизионные, обладают достаточно большой жесткостью узлов, что положительно сказывается на величине суммарной погрешности обработки за счет уменьшения погрешностей из-за упругих перемещений элементов технологической системы. Тем не менее вопросы, связанные с обеспечением требуемой точности обработки, определением погрешностей обработки на этапе разработки технологического процесса, выбором и корректировкой режимов резания в процессе обработки на основе получения оперативной информации (об изменении физико-механических свойств контактных пар инструмент-заготовка, геометрии режущего инструмента, сил резания и т. д.) по-прежнему являются актуальными.

Так, например, при определении погрешностей токарной обработки из-за упругих перемещений элементов технологической системы можно воспользоваться следующими традиционными зависимостями [1, 2]:

– при закреплении в центрах:

$$y = P_y \cdot \left[\frac{x^2 \cdot \left(L_{заг} - x\right)^2}{3 \cdot E \cdot J \cdot L_{заг}} + \frac{1}{j_{ст}} \right]; \qquad (1)$$

© Жданов А. А., Плотников А. Л., Тихонова Ж. С., Аржуханов Р. И., 2021.

– при закреплении в патроне с поджатием задним центром:

$$y = P_y \cdot \left[\frac{x^2 \cdot \left(L_{заг} - x\right)^3 \cdot \left(3 \cdot L_{заг} - x\right)}{12 \cdot E \cdot J \cdot L_{заг}^3} + \frac{1}{j_{ст}} \right], \quad (2)$$

где $L_{заг}$ – длина заготовки между точками закрепления, мм; x –расстояние от правого торца до места приложения силы, мм; E – модуль нормальной упругости, МПа (для конструкционных и углеродистых сталей $E = (1{,}9\ldots2{,}1) * 10^5$ МПа); $P_у$ – радиальная составляющая силы резания, Н; $j_{ст}$ – жесткость станка, Н/мм, которая для приведенных случаев закрепления определяется следующим образом [1]:

$$\frac{1}{j_{ст}} = \frac{1}{j_{суп}} + \left(\frac{x}{L_{заг}}\right)^2 \cdot \frac{1}{j_{п.б.}} + \left(\frac{L_{заг} - x}{L_{заг}}\right)^2 \cdot \frac{1}{j_{з.б.}}, \quad (3)$$

где $j_{п.б.}$ – жесткость передней бабки, Н/мм; $j_{з.б.}$ – жесткость задней бабки, Н/мм; $j_{суп}$ – жесткость суппорта, Н/мм; J – приведенный момент инерции сечения заготовки мм^4, для сплошных валов определяемый по формуле [1, 2]:

$$J = \frac{\pi \cdot d_{пр}^4}{64} \approx 0{,}05 \cdot d_{пр}^4 . \quad (4)$$

Если проанализировать величины, входящие в состав формул (1–2), можно сделать следующие выводы:

– геометрические параметры заготовки, такие как длина заготовки между точками закрепления и координата резца, определяются достаточно точно, поэтому влиянием погрешности их определения на результаты расчета можно пренебрегать;

– погрешность, вносимая расчетами момента инерции по приведенному диаметру, составляет менее 10 % [1]. Данная погрешность может быть снижена путем внесения соответствующих корректировок в расчетную формулу (5) для учета изменения приведенного диаметра заготовки за счет съема стружки в процессе обработки, а также за счет выполнения расчета величины упругих перемещений y для каждого конкретного технологического перехода;

– модуль нормальной упругости является одной из величин, характеризующих физико-механические свойства обрабатываемого материала. Безусловно, использование справочной величины, особенно, усредненной для всех марок стали, снижает точность результатов расчета. Ошибка при таком подходе будет лежать в пределах ±5 %. Влияние данного параметры также может быть снижено, например, за счет принудительного тестирования физико-механических свойств заготовок на этапе входного контроля;

– величину погрешности, вносимой традиционными справочными моделями расчета радиальной составляющей силы резания $P_у$, сложно спрогнозировать, однако она может достигать 100 % и более [3, 4]. Данная погрешность может быть уменьшена до уровня в ±10...15 % за счет разработки более совершенных математических моделей, предварительной или оперативной диагностики физико-механических свойств материалов заготовки и инструмента [3, 4];

– более подробно следует остановиться на параметре жесткости элементов технологической системы.

Жесткость элементов технологической системы изменяется в процессе эксплуатации оборудования и технологической оснастки. Производителями рекомендуется выполнять периодические проверки параметров жесткости станка на соответствие их паспортным данным, которые и используются при расчетах погрешности обработки, связанных с упругими перемещениями элементов технологической системы. Данный факт уже говорит о том, что действительное текущее значение параметра жесткости станка при расчетах неизвестно. Кроме того, различают динамическую $j_{дин}$ и статическую жесткость $j_{ст}$, причем коэффициент динамичности (отношение $j_{ст}$ / $j_{дин}$) составляет 1,2…2,0 [1, 2]. Динамическая жесткость определяется производственными или экспериментальными методами [5].

В расчетах погрешности обработки, связанных с упругими перемещениями элементов технологической системы, используется параметр статической жесткости, отчасти, потому что определить параметр $j_{дин}$ для каждого элемента технологической системы затруднительно (данный параметр обычно определяется для системы в целом). Таким образом, параметр жесткости вносит существенную ошибку в расчет погрешностей обработки. Кроме того, при определении динамической жесткости станка производственным методом типичной рекомендацией является определить усилие резания $P_у$ по справочным математическим моделям [5]. Это вносит еще большую неопределенность в результаты определения параметров жесткости и оценки коэффициента динамичности. Хотя, стоит отметить, что существуют способы определения динамической жесткости, при которых

усилие резания либо измеряется, либо прикладывается нагружающим устройством [5, 6]. Такие методы позволяют увеличить достоверность определения параметра $j_{дин}$, но не отвечают на вопрос: как учесть этот параметр в расчетах?

В таблице представлены данные расчета максимальной погрешности от упругих перемещений элементов технологической системы при токарной обработке нежесткого вала. Исходные данные: резец токарный проходной: $\varphi = \varphi_1 = 45^0$, $\gamma = 0^0$, $\lambda = 0^0$, $r = 1$ мм; схема закрепления заготовки – «в центрах»; материал резца: Т5К10; режимы обработки: V = 110 м/мин, S = 0,3 мм/об, t = 2 мм; материал заготовки: сталь 20; геометрия заготовки: ϕ50×400 мм; жесткость элементов технологической системы принята по паспорту токарно-винторезного станка 16К20; величина радиальной составляющей силы резания определена по пяти популярным машиностроительным справочникам.

Результаты расчета погрешностей от упругих перемещений элементов технологической системы

№ п./п.	Авторы справочника	Координата, мм	Жесткость станка, Н/мм	Сила резания, Н	Максимальная расчетная погрешность, мкм
		x	$j_{ст}$	$P_у$	y_{max}
1	А. Г. Косилова	200 (0,5*L)	6857	560	93
2	А. М. Дальский			430	71
3	Ю. В. Барановский			450	75
4	Е. И. Стружестрах			400	66
5	А. Н. Оглоблин			860	143
Максимальный разброс, max/min, %				215	215

Согласно сравнительному расчету, очевидно, что существенное влияние на величину ошибки при определении y_{max} оказывает разброс при расчете радиальной составляющей силы резания, о чем уже упоминалось в работах [1, 4]. Однако, помимо выше сказанного, нужно учитывать следующие тезисы:

– сложность учета в условиях реального производства разницы между статической и динамической жесткостью станка, что приводит к необходимости искусственно завышать коэффициент динамичности при расчете погрешностей для уменьшения вероятности получения брака;

– использование при определении динамической жесткости производственным методом расчетных моделей определения усилия резания $P_у$, что вносит дополнительные погрешности, которые могут достигать 100% и более при расчете по различным машиностроительным справочникам [1, 4].

Выводы

1. Показано, что традиционный производственный метод определения параметра динамической жесткости элементов технологической системы не позволяет получить достоверные результаты, которые могут быть использованы для прогнозирования погрешностей обработки на этапе проектирования технологического процесса.

2. Одной из причин расхождений результатов расчета погрешностей обработки является использование классических справочных моделей радиальной составляющей расчет силы резания, однако, эту погрешность можно минимизировать с использованием методов предварительной или оперативной диагностики физико-механических свойств контактных пар «инструмент-заготовка» и разработки адекватных и достоверных математических моделей.

3. Необходимо более детальное изучение и внедрение новых методов определения жесткости элементов технологической системы, установления достоверных и физически обоснованных взаимосвязей между параметрами статической и динамической жесткости.

4. Необходима доработка и четкое соблюдение на предприятиях методик по контролю параметров жесткости станочного оборудования в течение срока эксплуатации с целью предотвращения превышения действительными величинами жесткости паспортных значений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Маталин, А. А.* Технология машиностроения: учеб. для вузов / А. А. Маталин. – Л. : Машиностроение, Ленингр. отдел. – 1985 г. – 514 с.

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

3. *Жданов, А. А.* The mathematical models for cutting force calculation during structural and corrosion-resistant

steels` parts processing / А. А. Жданов, О. А. Курсин, С. Б. Фам // MATEC Web of Conferences. Vol. 298 : International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment: Mechanical Engineering and Materials Science (ICMTMTE 2019) (Sevastopol, Russia, September 9-13, 2019) / ed. by S. Bratan ; Sevastopol State University, National University of Science and Technology «MISiS», Polzunov Altai State Technical University, Inlink Ltd., International Union of Machine Builders. – [Publisher : EDP Sciences], 2019. – 5 p. – URL : https://doi.org/10.1051/matecconf/201929800099.

4. Повышение точности токарной обработки нежестких деталей из конструкционных сталей на станках с ЧПУ / А. А. Жданов, А. Л. Плотников, Ю. Л. Чигиринский, И. В. Фирсов // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 5 (184) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2016. – (Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении»). – С. 11–14.

5. Производственный способ определения жесткости узлов станков / М. В. Матрохин, Е. И. Федин, А. С. Ямников // Известия ТулГУ. Технические науки. – Тула, 2012. Вып. 12. Ч. 2. – С. 126–131с.

6. Пат. 2094177 Российская Федерация, МПК - В 23 В 25/06. Устройство для определения радиальной динамической жесткости шпиндельных узлов металлорежущих станков / Пуш А. В., Юркевич В. В, Шолохов В. Б. ; заявитель и патентообладатель Московский государственный технологический университет «СТАНКИН». – № 95110422/02 ; заявл. 21.06.1995 ; опубл. 27.10.1997.

УДК 621.9
DOI: 10.35211/1990-5297-2021-1-248-15-18

А. Р. Ингеманссон

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ МЕТОДОЛОГИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА И АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ В ЦИФРОВЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СИСТЕМАХ ДЛЯ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

АО «Федеральный научно-производственный центр «Титан-Баррикады»
E-mail: aleing@yandex.ru

В статье описаны основные положения разработанной методологии технологической подготовки производства и адаптивного управления стабильностью и качеством в автоматизированном механообрабатывающем производстве.

Ключевые слова: технологическая подготовка производства, адаптивное управление, индустрия 4.0, цифровые производственные системы.

A. R. Ingemansson

BASIC PATTERNS OF METHODOLOGY OF TECHNOLOGICAL PREPARATION OF PRODUCTION AND ADAPTIVE CONTROL IN DIGITAL PRODUCTION SYSTEMS FOR METALWORKING

JSC «Federal Scientific and Production Centre «Titan-Barricady»

In the article the basic patterns of developed methodology of technological preparation of production and adaptive control of stability and quality in automated metalworking industry are described.

Keywords: technological preparation of production, adaptive control, industry 4.0, digital production systems.

В работах [1, 2, 3] описаны структура и механизмы функционирования ЦПС в механообрабатывающем производстве, а также математические модели для технологической подготовки производства (ТПП) и адаптивного управления (АУ) стабильностью и качеством токарной и фрезерной обработки на автоматизированном оборудовании. Необходимо описать основные положения методологии ТПП и АУ стабильностью качества обработки и работоспособности инструментов в ЦПС для механической обработки.

На стадии ТПП инженер-технолог получает исходные данные для технологического проектирования: комплект конструкторской документации (КД) и технические условия (ТУ) на изготовление детали, данные о программе выпуска и др. Производится технологическое проектирование.

При разработке операций предварительной обработки руководствуются рядом критериев, в том числе объемом удаляемого материала в единицу времени. При этом для участков с автоматизированным оборудованием с ЧПУ существенное значение приобретает период работы станка или объем партии обработанных деталей до остановки оборудования для замены изношенных инструментов и переналадки. При

© Ингеманссон А. Р., 2021.

обработке стойкость инструмента связана с действующей на него нагрузкой, т.е. силами резания. Поэтому при предварительной обработке в качестве критерия АУ процессом резания в настоящей работе выступает нагрузка на режущий инструмент, поддержание стабильных значений которой во время обработки, обеспечивает надежную работу режущего инструмента.

АУ процессом резания по нагрузке на современном оборудовании с ЧПУ реализуется за счет активного мониторинга соотношения мощности резания $N_{рез}$, кВт к мощности привода главного движения $N_{ст}$, кВт. Диаграммы и числовые характеристики мощности привода главного движения в зависимости от частоты вращения и диапазона частот вращения указываются в паспортных данных оборудования с ЧПУ. Мощность резания определяется по известной из технологических справочников зависимости:

$$Nрез = \frac{Pz*v}{1020*60}, кВт. \quad (1)$$

Для систем ЧПУ современных ОЦ требуемая или допустимая нагрузка на привод главного движения, и, соответственно, на инструмент задается через процентное соотношении $N_{рез}$ к $N_{ст}$. Характеристика нагрузки P для системы ЧПУ определяется следующим образом:

$$P = \frac{Nрез}{Nст} * 100\ \%. \quad (2)$$

Инженером-технологом на стадии разработки комплекта документации на технологический процесс (ТП) определяются режимы резания, в частности, для предварительных операций. Скорость резания назначается исходя из требований по производительности и исходя из износостойкости инструментального материала. Коэффициент теплопроводности является присущей характеристикой выбранного инструментального материала. Методика определения данной характеристики для использования при технологическом проектировании предложена в работе [4]. При проектировании ТП принимается номинальное значение твердости. На этапе изготовления партии деталей определяется фактическая твердость материала конкретной детали, полученная в состоянии поставки или после промежуточных термических операций, предусмотренных ТП. На основе разработанных математических зависимостей [2] производится автоматизированный уточненный расчет силы резания Pz для заданных режимов и условий обработки и фактической твердости материала детали. По зависимости (2) инженером-технологом определяется и фиксируется в программном производственно-технологическом комплексе для ЦПС соответствующая характеристика нагрузки P на привод главного движения станка для каждой детали в партии. Из программного производственно-технологического комплекса для ЦПС формируется производственно-технологическая карта, содержащая требуемое значение нагрузки P для каждой изготавливаемой детали в партии, которая передается на производственный участок цеха.

На этапе ТПП при разработке ТП механической обработки инженер-технолог получает исходные сведения из КД о требуемом качестве обработанных поверхностей деталей, в частности, шероховатости. Осуществляется расчет режимов резания. Особенности, связанные с расчетом скорости резания, а также с параметрами теплопроводности инструментального и твердости обрабатываемого материалов, описаны выше. Расчету подлежит режимный параметр, оказывающий наиболее существенное влияние на величину шероховатости обработанной поверхности – подача. При заданной в КД величине среднего арифметического отклонения профиля Ra, *мкм* или величине среднего шага неровностей профиля Sm, *мм* выполняется расчет соответствующего значения подачи для операций чистового точения и фрезерования с использованием математического аппарата, изложенного в [2]. При необходимости, значение подачи при заданном параметре Ra или Sm может быть рассчитано для операций с бóльшим съемом по формулам, приведенным в [2].

После определения требуемой подачи выполняется расчет соответствующей силы резания Pz по формулам, приведенным в [2]. Для АУ контролируемая нагрузка P на привод главного движения для каждой детали в партии определяется по зависимости (2).

В программном производственно-технологическом комплексе для ЦПС инженером-технологом фиксируется рассчитанная требуемая величина подачи s_o для точения и s_z, s_o или $s_{мин}$ для фрезерования, а также требуемое значение нагрузки P на привод главного движения станка для каждой детали в партии. Из программного производственно-технологического комплекса для ЦПС формируется производственно-технологическая карта, содержащая указанные величины и передается на производственный участок цеха.

При выполнении операций предварительной обработки разработанная система действует следующим образом. Наладчик или оператор станка с ЧПУ или ОЦ, получив производственно-технологическую карту, заносит в систему ЧПУ станка значение требуемой нагрузки *P* на привод главного движения для конкретной детали в партии. В процессе операций предварительной обработки имеет место колебание припуска и твердости обрабатываемого материала. Соответственно, изменяется характер стружкообразования и контактного взаимодействия, действующая сила резания и нагрузка на привод главного движения, и, соответственно, на инструмент. Система АУ осуществляет автоматическое изменение подачи для приведения действующей нагрузки в соответствие с заданной. Тем самым реализуется постоянство действующей нагрузки на режущий инструмент в процессе операций предварительной обработки. Таким образом, в ЦПС на основе разработанных математических моделей [2] обеспечивается поддержание заданного периода работоспособности инструмента или объема партии обработанных деталей до остановки оборудования для замены изношенных инструментов и переналадки [3]. Блок-схема алгоритма АУ управления работоспособностью инструмента в ЦПС представлена на рис. 1.

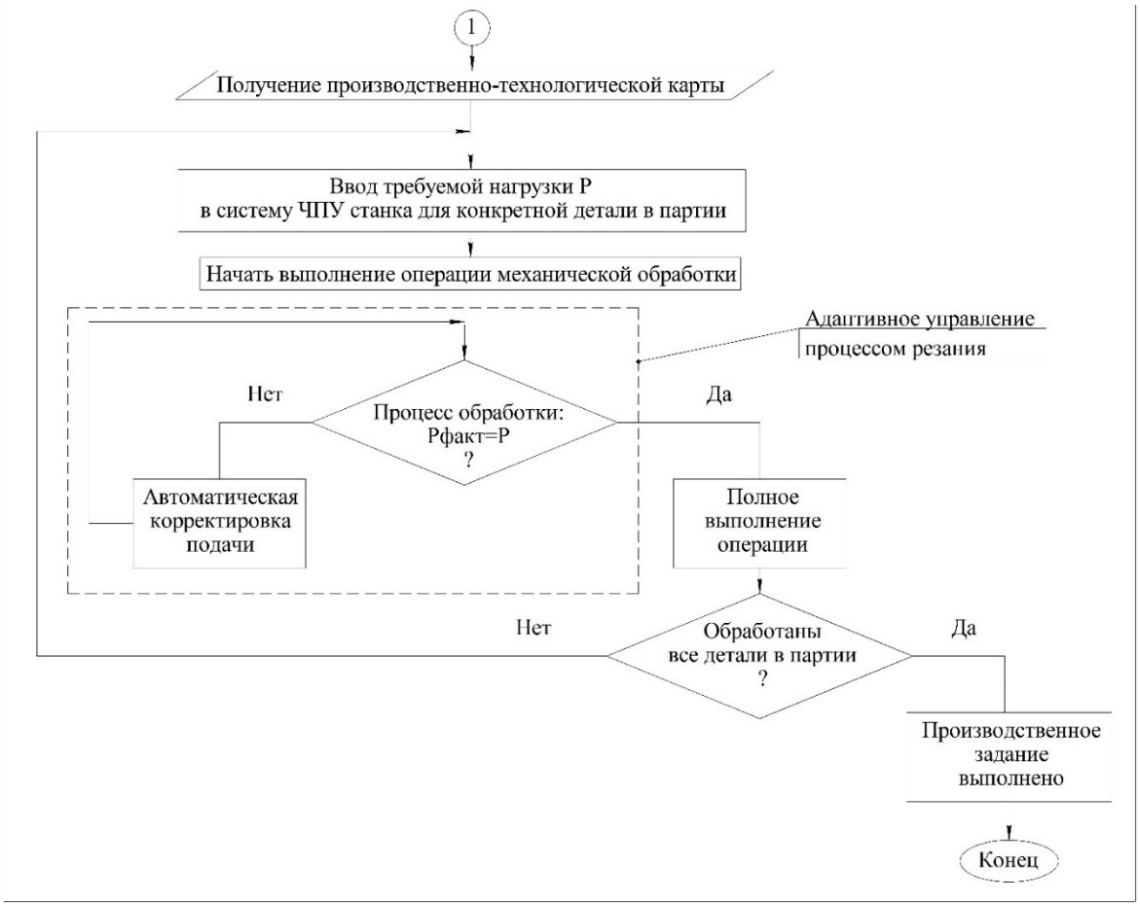


Рис. 1. Блок-схема алгоритма АУ работоспособностью инструмента в ЦПС

При выполнении операций чистовой обработки порядок функционирования системы следующий. В разработанной ЦПС для механической обработки наладчик или оператор станка с ЧПУ или ОЦ получает производственно-технологическую карту, содержащую требуемые величины подачи и нагрузки на привод главного движения для обеспечения стабильности получаемого качества обработанной поверхности и заносит их в систему ЧПУ станка для конкретной детали в партии. В процессе чистовой обработки имеет место колебание твердости обрабатываемого материала, а также изнашивание режущего инструмента. АУ выполняется изменением подачи при отклонениях нагрузки на привод. Таким образом, в ЦПС обеспечивается стабильность получения заданного качества поверхностей обработанных де-

талей (шероховатости и деформированного состояния поверхностного слоя) за счет АУ процессом резания на основе разработанных математических моделей [2, 3]. Блок-схема алгоритма АУ стабильностью качества обработки в ЦПС представлена на рис. 2.

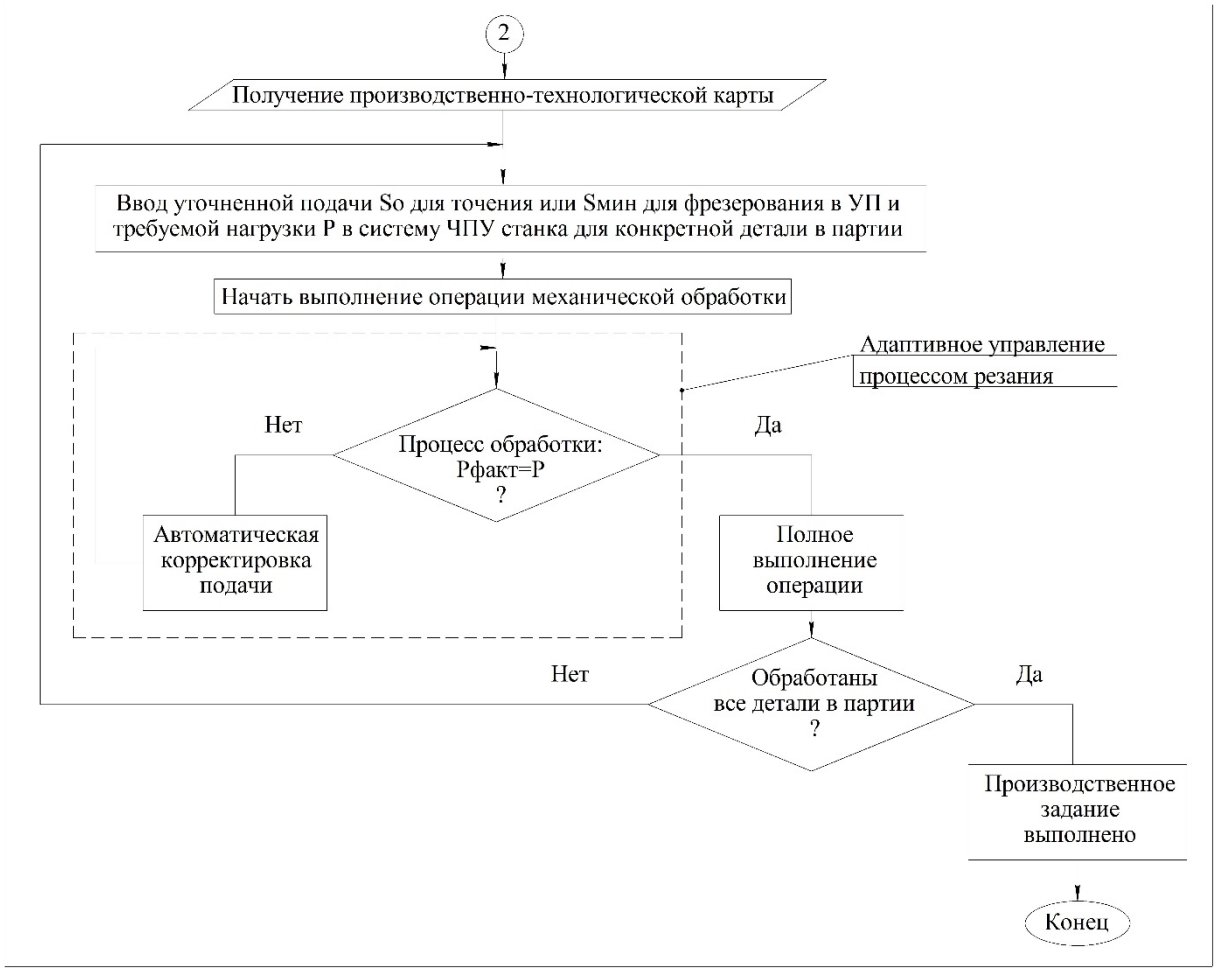


Рис. 2. Блок-схема алгоритма АУ стабильностью качества обработки в ЦПС

Таким образом, в статье описаны основные положения разработанной методологии ТПП и АУ стабильностью и качеством в автоматизированном механообрабатывающем производстве.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Ингеманссон, А. Р.* Разработка механизма функционирования цифровых производственных систем для механической обработки / А. Р. Ингеманссон // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 9 (232) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2019. – (Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении»). – С. 27–29.

2. *Ингеманссон, А. Р.* Расчетные зависимости для управления токарной и фрезерной обработкой в цифровых производственных системах / А. Р. Ингеманссон, Ю. Л. Чигиринский, В. В. Жуков // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 3 (238) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2020. – (Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении»). – С. 26–30.

3. *Ингеманссон, А. Р.* Исследование возможности адаптивного управления деформированным состоянием обработанных поверхностей и работоспособностью инструментов в цифровых производственных системах / А. Р. Ингеманссон // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 3 (238) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2020. – (Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении»). – С. 22–26.

4. *Ингеманссон, А. Р.* Расчетная методика определения теплопроводности современных твердосплавных инструментов с многослойными покрытиями / А. Р. Ингеманссон, А. А. Бондарев // Наукоемкие технологии в машиностроении. – 2019. – № 12. – С. 28–35.

УДК 621.9.04
DOI: 10.35211/1990-5297-2021-1-248-19-23

А. А. Кожевникова, А. А. Шведуненко

АЛЬТЕРНАТИВНЫЕ МЕТОДЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЗУБЧАТОГО КОЛЕСА ПЛАНЕТАРНОГО РЕДУКТОРА С ВНУТРЕННИМ ЗАЦЕПЛЕНИЕМ

Волгоградский государственный технический университет
E-mail: sanya9105@list.ru

В работе рассмотрены альтернативные методы изготовления зубчатых колес на примере изготовления зубчатого колеса планетарного редуктора. Проанализированы современные прогрессивные способы изготовления зубчатых колес, такие как лазерная и электроэрозионная обработка, на основе анализа выделены преимущества данных методов по сравнению со стандартными методами изготовления. Описаны преимущества технологического процесса изготовления зубчатого колеса альтернативными методами.

Ключевые слова: прогрессивные технологии, лазерная резка, электроэрозионная обработка, внутреннее зацепление.

A. A. Kozhevnikova, A. A. Shvedunenko

ALTERNATIVE METHODS FOR MANUFACTURING A GEAR WHEEL OF A PLANETARY REDUCTOR WITH INTERNAL GEARING

Volgograd State Technical University

The paper considers alternative methods of manufacturing gears using the example of manufacturing a gear of a planetary reductor. Modern progressive methods for the manufacture of gears, such as laser and electrical discharge machining, are analyzed, on the basis of the analysis, the advantages of these methods are highlighted in comparison with standard manufacturing methods. The advantages of the technological process of manufacturing a gear wheel by alternative methods are described.

Keywords: progressive technologies, laser cutting, EDM, internal gearing.

В современном производстве широко распространены способы изготовления зубчатых колес стандартными видами механической обработки, такими как нарезание профиля зубьев пальцевыми и дисковыми модульными фрезами, осуществляемое по методу копирования, нарезание червячными модульными фрезами, осуществляемое по методу обкатки, нарезание цилиндрических зубчатых колес зубодолблением, осуществляемое по методу обкатки.

В результате того, что при изготовлении зубчатых колес данными методами, точность получаемых деталей не очень высока (рис. 1) производят следующие способы окончательной обработки зубьев: процесс шевингования, заключающийся в введении обрабатываемого колеса в зацепление при скрещивающихся осях со специальным инструментом – шевером; процесс хонингования, при котором зубчатое колесо вращается в плотном зацеплении с абразивным зубчатым хоном, выполненным в виде косозубого колеса; процесс шлифования, осуществляемый профильным шлифовальным кругом [1].

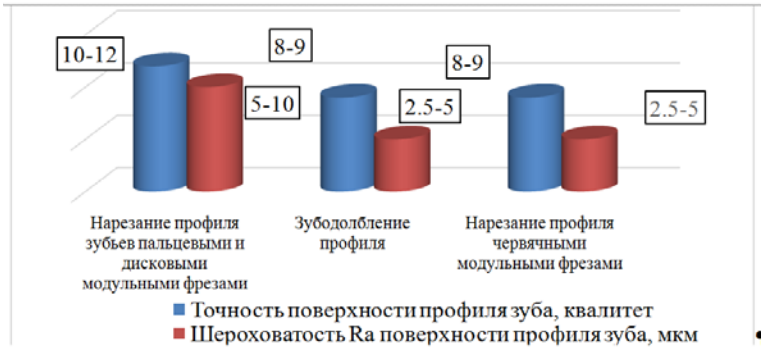


Рис. 1. Зависимость точности и шероховатости профиля зубчатого колеса от метода изготовления. Стандартные методы изготовления

© Кожевникова А. А., Шведуненко А. А., 2021.

При окончательной обработке профиля зубьев в зависимости от способа получают более высокую точность и шероховатость (рис. 2).

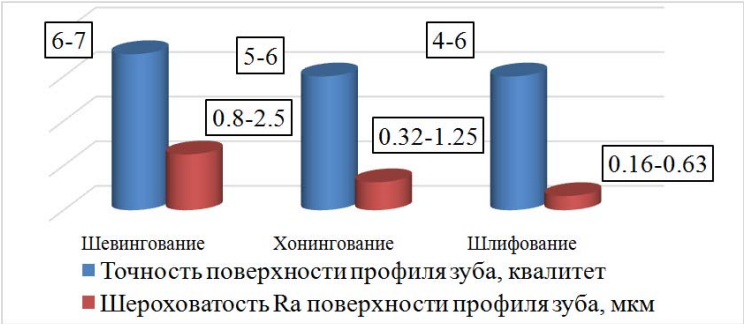


Рис. 2. Зависимость точности и шероховатости профиля зубчатого колеса от метода окончательной обработки профиля зуба

В рамках данной работы предполагается на основе анализа альтернативных методов изготовления зубчатых колес выбрать более предпочтительный, экономически выгодный, и менее трудоемкий способ изготовления зубчатого колеса планетарного редуктора (рис. 3) специального транспортного средства [2].

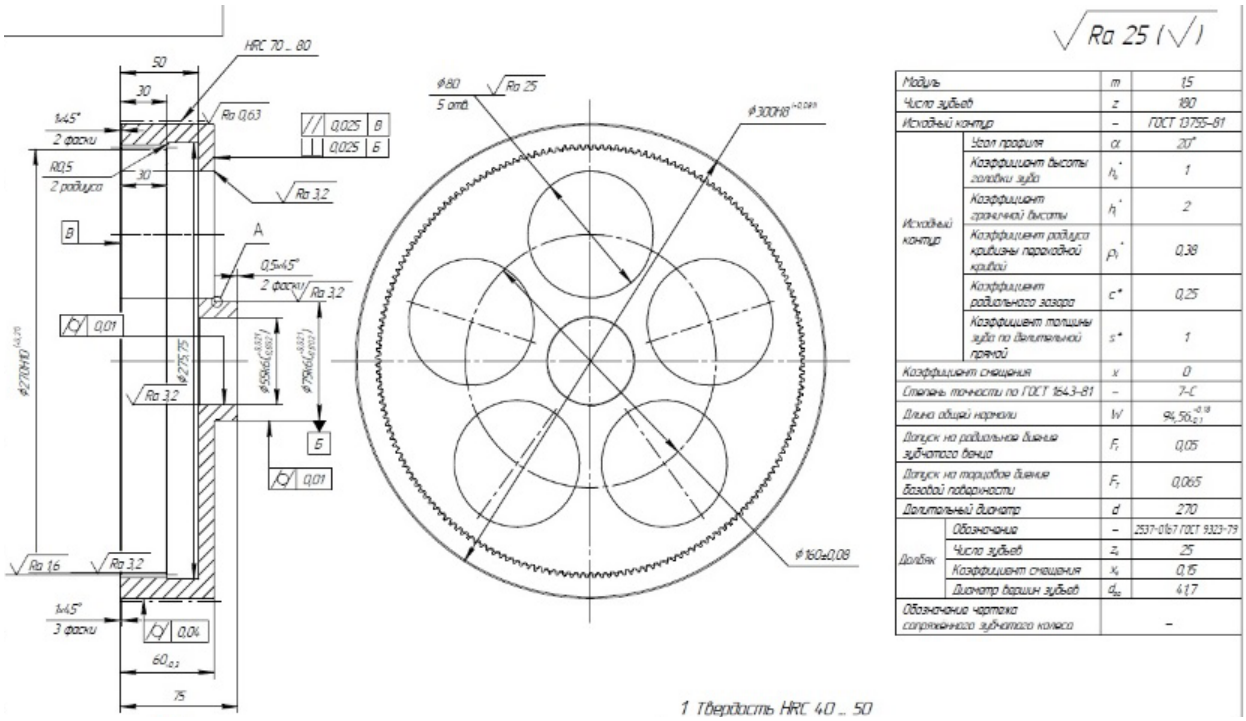


Рис. 3. Рабочий чертеж зубчатого колеса планетарного редуктора

Помимо известных методов изготовления колес с внутренним зубчатым существуют альтернативные методы, которые позволяют уменьшить время обработки деталей и повышают эффективность изготовления. В данной работе будут рассмотрены наиболее современные и прогрессивные методы изготовления колес, такие как лазерная резка и электроэрозионная обработка профиля зубчатого колеса.

Рассмотрим способ получения профиля зубчатого колеса лазерной резкой более детально. При изготовлении зубчатого колеса с внутренним зацеплением на станке для лазерной резки за счет сфокусированного лазерного луча, возможно разрезать различные виды сталей, независимо от их теплофизических свойств. В процессе резки материал разрезаемого участка плавится и выдувается струей газа.

Лазерная резка по сравнению со стандартными способами изготовления отличается тем, что отсутствует механическое воздействие на заготовку, а также возникают минимальные деформации после полного остывания обработанной детали. Благодаря этому лазерную обработку можно производить с высокой степенью точности. Нарезание профиля зубьев (рис. 4) производится за счет согласования координатных перемещений лазерного луча в осях X и Y по траектории *1*, при этом происходит поверхностная закалка.

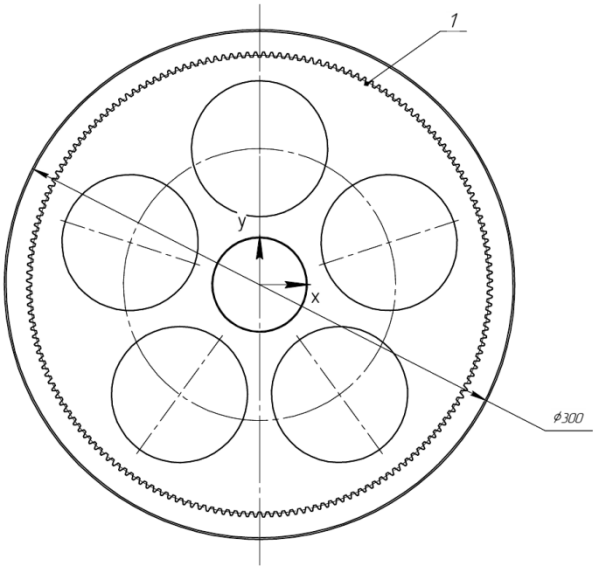


Рис. 4. Траектория движения лазерного луча при нарезании зубчатого венца

Изучая данные, полученные от производственной компании «МЕТАЛЛФОРМ» можно сказать, что при увеличении ширины обрабатываемого материала (табл. 1) ухудшается качество обрабатываемой поверхности, но увеличивается толщина поверхностной закалки [3].

Таблица 1

Параметры лазерной резки углеродистой стали

Толщина материала, мм	Ra, мкм	Rz, мкм	Глубина зоны термического влияния, мм
До 3	2,5	10	0,25
4	5	20	0,35
5			
6	10	40	0,35
8	20	80	0,75
10	40	160	0,85
12			

В табл. 2 представлены основные технологические операции при изготовлении зубчатого венца: в левой половине – типовой технологический маршрут, а в правой – предлагаемый, составленный на основе проведенного анализа и экспериментов [4].

Таблица 2

Основные технологические операции при изготовлении зубчатого венца

Типовой технологический маршрут		Предлагаемый технологический маршрут	
Зубчатые колеса из улучшенной стали (без закалки)	Зубчатые колеса из цементируемой или закаливаемой стали	Ширина зубчатых колес до 3 мм	Ширина зубчатых колес выше 3 мм
Черновая обработка заготовки	Черновая обработка заготовки	Термическая обработка	Термическая обработка
Термическая обработка (улучшение)	Чистовая обработка заготовки	Лазерная резка зубчатого колеса	Лазерная резка зубчатого колеса
Чистовая обработка заготовки	Обработка зубьев	–	Чистовая обработка зубьев
Обработка зубьев	Термическая обработка (закалка)	–	–
Чистовая обработка зубьев	Отделка посадочных поверхностей колеса (баз)	–	–
–	Чистовая обработка зубьев	–	–

При лазерном нарезании зубчатого колеса значительно сокращается число операций. Количество операций, их трудоемкость и энергоемкость, стоимость оборудования и инструмен-

та влияют на себестоимость обработки. При нарезании лазерным лучом не происходит механического контакта заготовки и инструмента, в связи с этим не происходит износа инструмента.

Далее рассмотрим электроэрозионную обработку зубчатых колес. Электроэрозионная обработка является прогрессивным методом изготовления деталей. Она применяется для изготовления деталей из труднообрабатываемых материалов, которые в некоторых случаях невозможно обработать механически. Производительность электроэрозионной обработки не зависит от твердости материала. При электроэрозионной обработке отсутствуют деформации, так как отсутствует силовое воздействие на деталь [5].

Существуют различные способы изготовления зубчатых колес электроэрозионным вырезанием. Колеса внутреннего зацепления могут обрабатываться последовательно впадина за впадиной или по несколько впадин с периодическим поворотом на требуемый угол. При этом траектория движения проволоки относительно заготовки программируется либо на профиль одной впадины, либо на профиль сектора из впадин нескольких зубьев [6].

Важными особенностями электроэрозионной обработки зубчатых колес являются:

– возможность упрочнения поверхности зуба колеса без применения дополнительной термической обработки;

– отсутствие дефектного слоя на поверхности зуба колеса после окончательной электроэрозионной обработки (в поверхностном слое возможны несущественные включения материала электрода);

– существенное сокращение времени на переналадку технологического оборудования при изменении параметров обрабатываемого зубчатого колеса и типа изготавливаемых деталей.

Проволочная электроэрозионная обработка за один проход обеспечивает шероховатость Ra 0,32…0,63. Чистовые проходы могут обеспечить Ra 0,04 и менее. Один небольшой эрозионный станок заменяет зубообрабатывающий и зубошлифовальный станки [7].

В заключении после анализа различных методов изготовления зубчатых колес была составлена зависимость (рис. 5), на основе которой можно оценить точность размеров и шероховатость поверхности полученной детали.

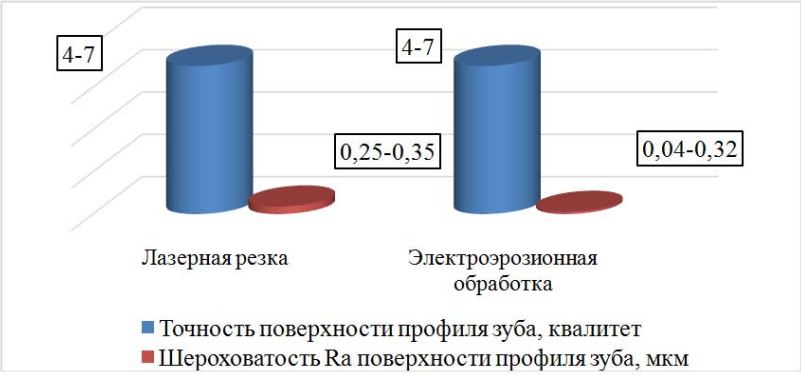


Рис. 5. Зависимость точности и шероховатости поверхности профиля зубчатого колеса от метода изготовления. Альтернативные методы изготовления

По результатам проведенного анализа можно сказать, что альтернативные методы изготовления зубчатых колес позволяют: автоматизировать процесс производства зубчатых колес, что в свою очередь минимизирует участие рабочего персонала и повышает качество изготовляемых деталей; сократить количество операций технологического процесса, что уменьшает затраченное время на обработку деталей; выполнять обработку деталей без специального инструмента, что способствует отсутствию износа инструмента; обрабатывать детали без механического воздействия, что приводит к отсутствию микронапряжений и деформаций в обрабатываемой детали; обрабатывать труднообрабатываемые материалы, и материалы подвергнутые термообработке; упрочнить поверхность зуба колеса без применения дополнительной термической обработки. Но в свою очередь недостатком данных методов является высокая стоимость оборудования. Альтернативные методы изготовления колес являются перспективным направлением в сфере импортозамещения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Обработка зубчатых колес: учебн. пособие / В. Ф. Пегашкин ; М-во образования и науки РФ: ФГАОУ ВО «УрФУ им. первого Президента России Б.Н. Ельцина», Нижнетагил. технол. ин-т (фил.). – Нижний Тагил : НТИ (филиал) УрФУ, 2016. – 132 с.

2. *Шведуненко, А. А.* Проработка компоновки и анализ работоспособности ходовой части специального транспортного средства // Конкурс научно-исследовательских работ студентов Волгоградского государственного технического университета : тез. докл. / редкол. : С. В. Кузьмин (отв. ред.) [и др.] ; ВолгГТУ. – Волгоград, 2020. – С. 130–131.

3. Металлформ: сайт. – URL: http://www.metalform.ru/services/glass/carbon_steel (дата обращения: 27.10.2020).

4. *Учаев, П. Н.* К вопросу изготовления цилиндрических зубчатых колес лазером / П. Н. Учаев, М. В. Райник // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. – 2013. – № 1. – С. 66–70.

5. *Линовский, А. В.* Исследование способа изготовления зубчатых колес с применением электроэрозионной обработки / А. В. Линовский // European scientific conference: сборник статей победителей IV Международной научно-практической конф. – Изд-во: «Наука и Просвещение». – Пенза, 2017. – С. 74–76.

6. *Кравченко, Д. В.* Экономическая эффективность процесса электроэрозионного вырезания венцов цилиндрических зубчатых колес / Д. В. Кравченко // Вестник УлГТУ. – 2000. – № 4. – С. 88–9.

7. *Коротких, М. Т.* Структура поверхности зубчатых колес при обработке электроэрозионным вырезанием : матер. науч. конф. с междунар. участием / М. Т. Коротких, К. А. Полубок ; Институт металлургии, машиностроения и транспорта. Ч. 2. – СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2016. – С. 186–189.

УДК 621.92
DOI: 10.35211/1990-5297-2021-1-248-23-26

В. А. Носенко, М. В. Даниленко, В. В. Васильев

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ХАРАКТЕРА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КОНТАКТИРУЮЩИХ ВЕРШИН ЗЕРЕН НА ПОВЕРХНОСТИ ШЛИФОВАЛЬНОГО КРУГА С УЧЕТОМ МНОГОПРОХОДНОСТИ ПРОЦЕССА

Волжский политехнический институт (филиал) ВолгГТУ
E-mail: vladim.nosenko2014@yandex.ru

В статье изложена методика определения характера распределения контактирующих вершин зерен на рабочей поверхности шлифовального круга в зависимости от времени шлифования. Число контактирующих зерен определяется по вероятности контакта. Отличительная особенность заключается в использовании математической модели, учитывающей изменения распределения вершин зерен в результате изнашивания абразивного инструмента за период шлифования. Рассмотрены вероятности трех видов изнашивания: истирания и скалывания вершины зерна, вырывания зерна из связки круга. Изменение положения вершины зерна под действием того или иного вида изнашивания определяется с использованием Марковских случайных процессов. Условия шлифования, учтенные в модели: характеристика абразивного инструмента, режим шлифования, обрабатываемый материал, начальное распределение зерен на рабочей поверхности абразивного инструмента и прочность их удержания. Результаты работы могут быть использованы для решения задач, связанных с определением интенсивности теплообразования в зоне контакта шлифовального круга и заготовки, расчета мощности резания, износа инструмента и других вопросов, связанных с исследованием процесса шлифования.

Ключевые слова: математические модели, шлифование, абразивный инструмент, вероятность контакта, виды изнашивания.

V. A. Nosenko, M. V. Danilenko, V.V. Vasilyev

DETERMINING THE CHARACTER OF DISTRIBUTION THE CONTACT-ING VERTICES OF GRAINS AT THE SURFACE ON THE GRINDING WHEEL, TAKING INTO ACCOUNT THE MULTI-PASSAGE OF PROCESS

Volzhsky Polytechnical Institute (Branch)

The article is devoted to the method of determining the nature of distribution the contacting vertices of grains on the working surface of grinding wheel, depending on the grinding time. The number of contacting grains is determined by the probability of contact. A distinctive feature is the use of a mathematical model that takes into account the change in the distribution of grain vertices as a result of wear of the abrasive tool during the grinding period. Considered the probabilities in three types of wear: abrasion and spallation of the grain's vertices, pull-out grain from the bundles of the wheel. Changing the position of the grain's vertices under the action of a particular type of wear is determined using random Markov's processes. The method takes into account the influence of the following factors: characteristics of the abrasive tool, the grinding mode, the material to be processed, the initial distribution of grains on the abrasive tool working surface and the strength of their retention. The results of the study may be used to solve problems related to determining the intensity of heat generation in the contact zone of the grinding wheel and the billet, calculation of cutting power, tool wear and other issues related to the study of the grinding process.

Keywords: mathematical models, grinding, abrasive tool, contact probability, types of wear.

© Носенко В. А., Даниленко М. В., Васильев В. В., 2021.

Создание методик численного расчета и основанных на них программных средств для автоматизированного проектирования шлифовальных операций в настоящее время является актуальной научно-практической задачей, эффективное решение которой во многом определяется адекватностью модельных представлений о строении рабочей поверхности (РП) шлифовального круга (ШК), используемых в процессе исследований и анализа.

Известные модели РП ШК существенно отличаются друг от друга по ряду параметров [1–3], что можно объяснить различием применяемых подходов и методик исследований. Модель рельефа поверхности шлифовального круга, основанная на усовершенствованном методе Монте-Карло представлена в работе [4]. Функцию плотности распределения вершин абразивных зерен с учетом их разновысотности определяют посредством измерения топографии поверхности круга. Согласно найденному распределению высоты выступа зерна, вершина генерируется случайным образом и размещается на поверхности круга.

Несмотря на случайный характер распределения зерен, в простейших моделях [5, 6] принимают равномерное распределение зерен по поверхности круга, при этом количество активных зерен может быть определено при помощи аналитических зависимостей [7]. Такие модели имеют невысокую точность и недостаточно полно отражают протекающие при шлифовании физические процессы.

В настоящее время отсутствует единое мнение о характере распределения вершин абразивных зерен в объеме рабочего слоя инструмента, осуществляющих срезание припуска с обрабатываемой заготовки.

При моделировании процесса шлифования необходимо знать распределение контактирующих вершин зерен и координаты их расположения на поверхности шлифовального круга. Таким образом, для оценки и сопоставления известных данных, а также получения дополнительной информации было принято решение о проведении исследований показателей распределения вершин зерен по поверхности инструмента с учетом реальных условий формирования рельефа РП ШК.

Зона контакта ШК и заготовки представляет собой область V, ограниченную снизу условной наружной поверхностью шлифовального круга, сверху плоскостью COZ (рис. 1), За условную наружную поверхность ШК принимаем поверхность цилиндра, проходящую через наиболее выступающую вершину зерна (рис. 1). Ось цилиндра совпадает с осью вращения ШК. Плоскость COZ проведена через максимальный выступ неровности обрабатываемой поверхности заготовки.

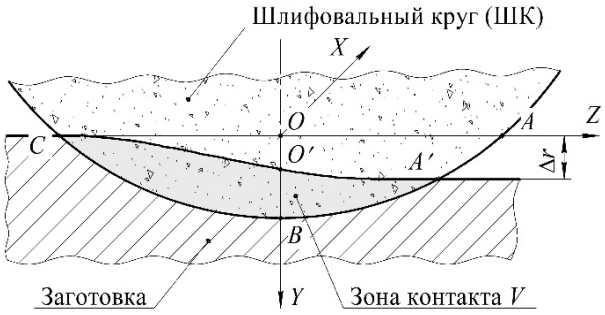


Рис. 1. Зона контакта шлифовального круга и заготовки

Так как процесс микрорезания сопровождается удалением материала в виде стружки, с поверхности заготовки снимается некоторый слой материала, толщиной Δr. В результате контакт вершины наиболее удаленного зерна с обрабатываемым материалом происходит не в точке A, а в точке A'. Согласно данным, представленным в работе [8], закономерность съема припуска определяется линией $CO'A'$, имеющей уровень вероятности контакта $p_к \approx 0{,}0027$.

Разделим область зоны контакта V горизонтальными и вертикальными плоскостями параллельными координатным осям на n элементарных микрообъемов. Расстояние между плоскостями примем равным радиальному износу круга за один оборот $\Delta R(k)$. Тогда элементарный объем, приведенный к единице высоты ШК:

$$\Delta V = \Delta y \times \Delta z, \text{ где } \Delta y = \Delta z = \Delta R(k). \qquad (1)$$

Положение центра каждого микрообъема ΔV_{ij} определяется двумя координатами y_i, z_j [9]. Количество элементарных объемов зависит от размеров зоны контакта, и является величиной переменной в процессе шлифования. Микрообъем ΔV_{ij} можно считать бесконечно малым, поэтому плотность распределения зерен внутри данного объема $\rho_з(y_i;\ z_j)$ примем постоянной. Тогда, количество вершин в микрообъеме:

$$\Delta n_{ij} = \rho_з(y_i;\ z_j) \cdot \Delta y \Delta z. \qquad (2)$$

Не все вершины абразивных зерен, находящиеся в элементарном микрообъеме проходя через зону контакта взаимодействуют с заго-

товкой. Их количество должно определятся с учетом вероятности контакта. Вероятность контакта вершины зерна с обрабатываемым материалом можно рассчитать по известной теоретико-вероятностной модели Ю. К. Новоселова и А. В. Королева [10].

Количество контактирующих вершин зерен в каждом из микрообъемов определяется по формуле:

$$\Delta n_{\text{зкij}} = \rho_{\text{з}}(y_{\text{i}};\, z_{\text{j}})\cdot p_{\text{к}}(y_{\text{i}};\, z_{\text{j}})\cdot \Delta y \Delta z. \qquad (3)$$

В процессе шлифования контактирующие с обрабатываемой поверхностью вершины зерен подвергаются различным видам изнашивания, что приводит к изменению плотности их распределения по глубине РП ШК. В свою очередь непостоянство плотности распределения вершин зерен влияет на шероховатость обрабатываемой поверхности и вероятность неудаления материала. Таким образом, вероятность контакта, также является величиной переменной, изменяющейся в той или иной степени после каждого оборота круга [11].

В качестве примера, рассмотрим реализацию данной методики для случая плоского шлифования периферией круга. Исходные данные для расчета: обрабатываемый материал – Сталь 45 ГОСТ 1050 (*HRC* 42…45); ШК – 1 200×20×76 25А *F*60 *K* 6 *B* 50 м/с 1 кл. ГОСТ Р 52781–2007; $v_{\text{к}}$ = 37 м/с; $v_{\text{з}}$ = 12 м/мин; S_{t} = 0,01 мм/ход.

На первых оборотах круга уменьшение количества зерен в результате вырывания компенсируется поступлением вершин из более глубоких слоев в результате их перехода в нижележащий слой на величину износа круга за оборот. К 300-му обороту круга доля вырываемых зерен возрастает, круг переходит в режим самозатачивания и плотность распределения вершин зерен начинает уменьшаться (рис. 2).

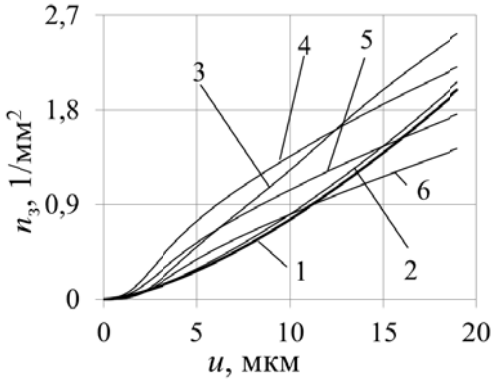


Рис. 2. Плотность распределения вершин зерен $n_{\text{з}}$ по глубине РП ШК в различные периоды шлифования (обороты круга):
1 – начальное распределение; *2* – 30 об.; *3* – 300 об.; *4* – 900 об.; *5* – 1200 об.; *6* – 1500 об.

Среднее количество контактирующих вершин в единицу времени неодинаково и зависит от положения рассматриваемого микрообъема в зоне взаимодействия с обрабатываемой поверхностью. Больше контактирующих вершин зерен находится в середине зоны взаимодействия, вблизи основной плоскости. Меньшее количество вершин соответствует положениям входа и выхода из зоны контакта (рис. 3).

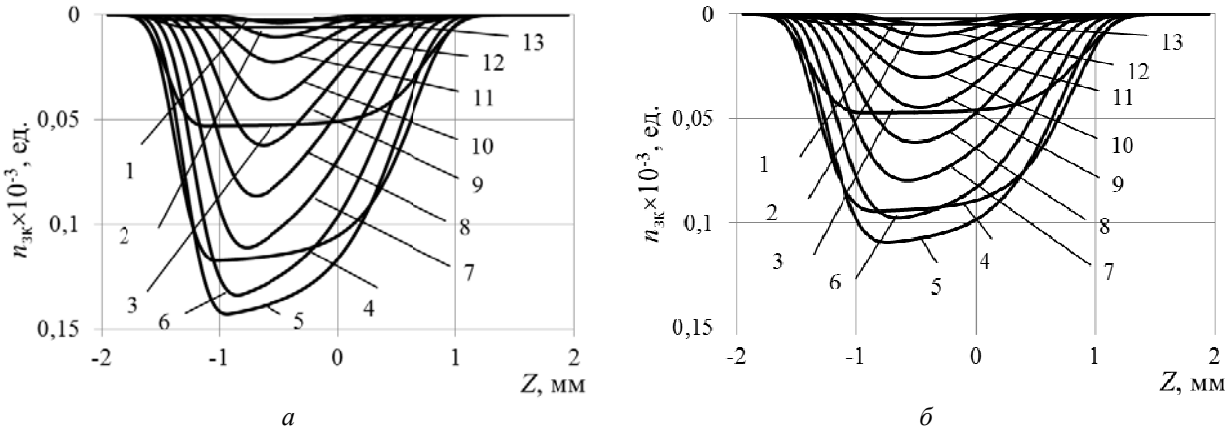


Рис. 3. График изменения количества контактирующих в микрообъеме вершин зерен $n_{\text{зк}}$ по длине дуги контакта на 300 (*а*) и 1500 (*б*) обороте для различных расстояний *u* от условной наружной поверхности ШК:
1 – *u*=0,5 мкм; *2* – *u*=1,5 мкм; *3* – *u*=2,5 мкм; *4* – *u*=3,5 мкм; *5* – *u*=4,5 мкм; *6* – *u*=5,5 мкм; *7* – *u*=6,5 мкм; *8* – *u*=7,5 мкм; *9* – *u*=8,5 мкм; *10* – *u*=9,5 мкм; *11* – *u*=10,5 мкм; *12* – *u*=11,5 мкм; *13* – *u*=12,5 мкм

Данные, представленные на рис. 2, 3 позволяют определить суммарное число контактирующих вершин зерен в слое на любом обороте ШК (рис. 4). В период обработки, соответст-

вующий 30 – 900 оборотам круга, происходит увеличение вершин зерен в слоях, расположенных на глубине до 2,5 мкм, и уменьшение числа вершин в слоях на глубине от 2,5 до 15 мкм. Причины такого изменения связаны с изменением плотности распределения вершин зерен в результате изнашивания, объема удаленного металла и вероятности контакта. На последующих оборотах происходит уменьшение количества контактирующих вершин зерен во всех слоях РП ШК.

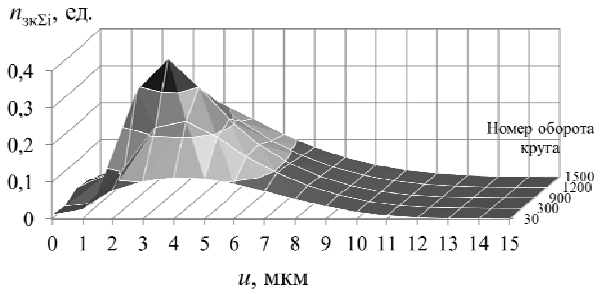


Рис. 4. Диаграмма распределения суммарного числа контактирующих вершин зерен $n_{зкΣi}$ в i-м слое по глубине РП ШК в различные периоды шлифования (обороты круга)

Заключение. Проведенные исследования позволят использовать разработанную методику определения распределения контактирующих вершин зерен на РП ШК для моделирования, анализа, прогнозирования показателей процесса шлифования, что является перспективным и актуальным направлением в области абразивной обработки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Werner K., Klocke F., Brinksmeier E.* Modelling and simulation of grinding processes // Proc. of the 1st European Conf. on Grinding, Aachen, 6-7 November 2003. P. 8-1–8-27.

2. *Переладов, А. Б.* Вероятностная компьютерная модель рабочего слоя шлифовального круга / А. Б. Переладов, И. П. Камкин // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 20(123) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2013. – (Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении». – С. 49–52.

3. Detailed modeling of cutting forces in grinding process considering variable stages of grain-workpiece micro interactions / Hao Nan Li, Tian Biao Yu, Zi Xuan Wang, Li Da Zhu, Wan Shan Wang // International Journal of Mechanical Sciences, 2017, vol. 126, pp. 319–339.

4. Influence of surface topography evolution of grinding wheel on the optimal material removal rate in grinding process of cemented carbide / Yuzhou Zhang, Xipeng Xu // International Journal of Refractory Metals & Hard Materials, 2019, vol. 80, pp. 130–143.

5. *Chen X., Rowe W.B.* Analysis and simulation of the grinding process. Part I: Generation of the grinding wheel surface // International Journal of Machine Tools and Manufacture. 1996. Vol. 36, no. 8. P. 871-882.

6. Dynamic grinding force model for carbide insert peripheral grinding based on grain element method / Sijie Cai a, Bin Yao, Qing Zheng, Zhiqin Cai, Wei Feng, Binqiang Chen, Ze He // Journal of Manufacturing Processes, 2020, vol. 58, pp. 1200-1210. https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.09.029

7. *Li K., Liao W.* Modelling of ceramic grinding processes Part I. Number of cutting points and grinding forces per grit // Journal of Materials Processing Technology. 1997. Vol. 65, no. 1. P. 1-10.

8. *Новоселов, Ю. К.* Динамика формообразования поверхностей при абразивной обработке : монография / Ю. К. Новоселов. – Севастополь : Изд-во СевНТУ, 2012. – 304 с.

9. *Носенко, В. А.* Динамическая теоретико-вероятностная модель силы резания при шлифовании / В. А. Носенко, М. В. Даниленко // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 12 (207) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2017. – (Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении»). – С. 31–33.

10. *Королев, А. В.* Теоретико-вероятностные основы абразивной обработки. Часть 2. Взаимодействие инструмента и инструмента и заготовки при абразивной обработке / А. В. Королев, Ю. К. Новоселов. – Саратов : Изд-во Саратовского университета, 1989. – 160 с.

11. *Носенко, В. А.* Математическое моделирование распределения вершин зерен при шлифовании в результате различных видов изнашивания с использованием Марковских случайных процессов / В. А. Носенко, Е. В. Федотов, М. В. Даниленко // Международный научно-исследовательский журнал. – 2015. – № 2-1 (33). – С. 101–106.

УДК 621.92
DOI: 10.35211/1990-5297-2021-1-248-27-30

В. А. Носенко, А. В. Фетисов, С. П. Кузнецов, В. Г. Карпов

СОСТОЯНИЕ ОБРАБОТАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ СПЛАВА НА ОСНОВЕ НИОБИЯ ПРИ ШЛИФОВАНИИ КРУГОМ ИЗ КАРБИДА КРЕМНИЯ

Волжский политехнический институт (филиал) ФГБОУ ВПО «Волгоградский государственный технический университет»

E-mail: nosenko@post.volpi.ru

Исследование поверхности сплава на основе ниобия выполнены на электронном микроскопе Versa 3D. Обработку сплава выполняли методом врезания кругом из карбида кремния на керамической связке. Морфология обработанной поверхности свидетельствует об интенсивном адгезионном взаимодействии металла с абразивным материалом. Установлен факт переноса продуктов износа шлифовального круга на обработанную поверхность и внедрение в металл. Химический состав продуктов износа определяли методом рентгеноспектрального анализа. На основании полученных данных о химическом составе продуктов износа экспериментально доказано присутствие на обработанной поверхности кристаллов карбида кремния, керамической связки и их сочетаний. Приведены данные о размере кристаллов, внедренных в обработанную поверхность.

Ключевые слова: ниобий, шлифование, карбид кремния, морфология, химический сосав, рентгеноспектральный микроанализ.

V. A. Nosenko, A. V. Fetisov, S. P. Kuznetsov, V. G. Karpov

CONDITION OF THE TREATED SURFACE OF NIOBIUM-BASED ALLOY WHEN GRINDING FROM SILICON CARBIDE

Volzhsky Polytechnic Institute (branch) of the Volgograd State Technical University

The study of the surface of silicon carbide after grinding niobium was carried out on a Versa 3D electronic microscope. It is shown that as a result of the grinding, traces of the grinding wheel material are formed on the treated surface, and the ground material itself is prone to adhesion to the grinding wheel. As a result of cohesive interaction, the metal adhering to the grinding wheel is transferred, and vice versa. And, as a result of adhesion-fatigue processes, mechanical action, there is a hanging wear of the grinding wheel and the indentation of individual crystals of silicon carbide into the surface of the metal being processed. This article examines such features of the behavior of niobium, when grinding it with silicon wheels and is considered from the standpoint of the electronic structure of the metal atom.

Keywords: niobium, grinding, silicon carbide, morphology, chemical suction, X-ray microanalysis.

Введение

Жаропрочные сплавы на основе ниобия используются в авиационных реактивных двигателях для изготовления дисков и неохлаждаемых турбинных лопаток взамен охлаждаемых. Благодаря высокой устойчивости при облучении и сравнительно небольшому захвату тепловых нейронов применяются в атомной энергетике. В связи с этим, к качеству обработанной поверхности изделий из сплавов на основе ниобия предъявляются высокие требования [1, 2]. Шлифованием относится к числу финишных операций, во многом определяющих качество поверхности изделия, что свидетельствует об актуальности исследования данного процесса. По критерию интенсивности контактного взаимодействия пары абразив-металл, оцениваемого по количеству абразивного материала, перенесенного на обработанную поверхность при шлифовании, ниобий относится к группе адгезионно-активных металлов [3].

Отличительной особенностью абразивной обработки, по сравнению с лезвийной, является способность к самозатачиванию. Самозатачиваемость – свойство шлифовального круга длительно сохранять работоспособное состояние за счет непрерывного образования новых режущих кромок абразивных зерен. Образование новых режущих кромок происходит в результате поверхностного выкрашивания и скалывания вершин зерен.

С использованием последних мировых достижений в области контроля качества обработанной поверхности [4–6] Осколки кристаллов или зерен, вырванных из связки круга, способны переноситься на обработанную поверхность. Перенос абразивного материала происходит при шлифовании различных металлов

© Носенко В. А., Фетисов А. В., Кузнецов С. П., Карпов В. Г., 2021.

кругами из карбида кремния, корунда, сверхтвердых материалов [7–10]. Менее изучен перенос материалов при шлифовании сплавов на основе ниобия.

Цель работы

Исследование морфологии и химического состава поверхности ниобия после шлифования абразивным инструментом из карбида кремния.

Методы исследования

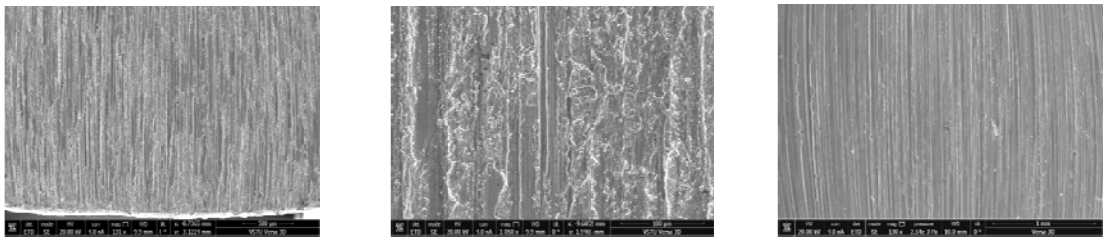
Морфологию и химический состав обработанной поверхности исследовали на электронном микроскопе Versa 3D DualBeam. Химический состав определяли методом локального микрорентгеноспектрального анализа. Заготовки из ниобиевого сплава обрабатывали на прецизионном плоскошлифовальном станке с ЧПУ мод. CHEVALIER Smart – B1224 III [11]. Шлифование осуществляли методом врезной подачи кругом из карбида кремния 1 350x20x127 64CF60K7V на керамической связке с охлаждением. Режим обработки: v – 35 м/с; v_s – 12 м/мин; S_t – 0,010 мм/ход, без выхаживания; припуск – 0,5 мм.

Результаты исследований и обсуждение

Обработанная поверхность при шлифовании является результатом царапания большого количества вершин зерен, расположенных на рабочей поверхности абразивного инструмента, обрабатываемой поверхности. На рис. 1, *а* показана обработанная поверхность на последнем проходе со стороны выхода шлифовального круга. Направление подачи стола попутное, в привязке к рассматриваемому рисунку – снизу вверх, направление главного движения – сверху вниз. На поверхности можно выделить отдельные царапины. При базовом увеличении 1050 крат относительно чистые царапины, на которых различимы микронеровности вершины зерна, встречаются редко (рис. 1, *б*). Состояние поверхности сплава после шлифования кругом из карбида кремния свидетельствует о достаточно интенсивном адгезионном взаимодействии металла с абразивным инструментом из карбида кремния.

Очевидно, металл интенсивно налипает на вершины наиболее выступающих зерен рабочей поверхности круга. При последующем контакте вершины зерна с обрабатываемым металлом, налипы образовавшиеся на вершинах зерен переносятся на поверхность царапины. В результате адгезионно-когезионного взаимодействия зерна с металлом и налипшего на вершину зерна металла с обрабатываемым материалом формируется обработанная поверхность, представленная на рис. 1. Например, при шлифовании сплава никеля кругом из кубического нитрида бора обработанная поверхность достаточно чистая, царапины на поверхности никеля хорошо различимы, что свидетельствует о низкой интенсивности адгезионного взаимодействия (рис. 1, *в*).

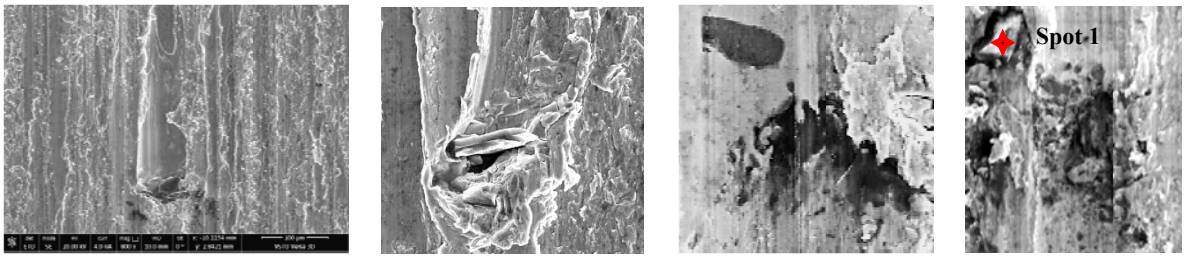
Предполагаемыми продуктами износа шлифовального круга из карбида кремния на керамической связке могут быть кристаллы карбида кремния, керамической связки и их сочетание. Анализ химических элементов, входящих в состав карбида кремния и связки позволяет утверждать, что средний атомный номер продуктов износа будет существенно меньше атомного номера сплава ниобия. Например, средний атомный номер SiC – 10, сплава ниобия – более 40. В связи с существенной разницей среднего атомного номера продуктов износа абразивного инструмента и ниобия использовали фотографии обработанной поверхности, полученные в отраженных (обратно-рассеянных) электронах, на которых предполагаемые продукты износа абразивного инструмента выделяются более темным цветом.



а *б* *в*

Рис. 1. Состояние обработанной поверхности сплава на основе ниобия после шлифования кругом из карбида кремния при базовом увеличении 131 крат (*а*) и 1050 крат (*б*) и никелевого сплава при шлифовании кругом из кубического нитрида бора (*в*)

На рис. 2 приведены некоторые фотографии предполагаемых продуктов износа абразивного инструмента, обнаруженные на обработанной поверхности. Продукты износа частично или полностью вдавлены в металл (рис. 2). Скалывание вершины абразивного материала или вырывание зерна из связки круга может происходить в момент царапания вершиной зерна (рис. 2, *а*). Размер объекта по горизонтали (направление перпендикулярное скорости главного движения) около 70 мкм. При скалывании вершины зерна или вырывании зерна из связки возможно изменение первоначальной траектории главного движения (рис. 2, *б*). Размер отдельных объектов может приближаться к среднему размеру зерна шлифовального круга.

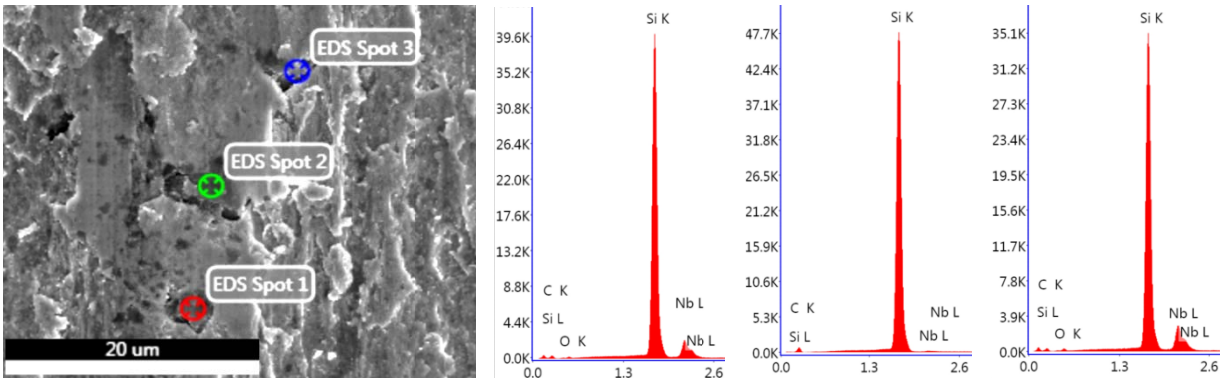


а *б* *в* *г*

Рис. 2. Перенос материала абразивного инструмента на обработанную поверхность

На рис. 2,*а* в правой и левой части относительно траектории главного движения видны более мелкие вкрапления размером от 10 до 1 мкм и менее (рис. 2, *в*, *г*). Объекты расположены на дне царапин, оставленных другими вершинами зерен. Поэтому, можно предположить, что перенос данного объекта или объектов произошел на предыдущем проходе или на данном проходе, но в начале длины дуги контакта инструмента с обрабатываемым материалом. В результате столкновения с другими вершинами зерен, проходящих через рассматриваемый участок поверхности, произошло дробление объекта с последующим вдавливанием в обработанную поверхность.

Похожие состояние поверхности показано на рис. 3, *а*. Рентгенограммы трех анализируемых объектов в точках Spot 1, Spot 2 и Spot 3 приведены на рис. 3, *б–в*.



а *б* *в* *г*

Рис. 3. Морфология обработанной поверхности с инородными объектами внедрения (*а*) и рентгенограммы в трех точках объектов Spot 1 (*б*), Spot 2 (*в*) и Spot 3 (*г*)

В точке Spot 2 (рис. 4, *а*) присутствуют два основных химических элемента – кремний и углерод в количестве соответственно 50,1 и 49,7 атомарных процентов, что соответствует химической формуле карбида кремния (SiC). На поверхности кристалла обнаружены так же следы ниобия. Химический состав в точках Spot 1 и Spot 3 почти одинаков и содержит четыре основные химические элементы: углерод, кремний, кислород и ниобий. Содержание атомов углерода – около 35 %, кремния – около 55 %. Если ориентироваться на химическую формулу SiC, в веществе содержится избыточный кремний. Наличие кислорода и избыточного кремния возможно в результате присутствия в анализируемом объеме некоторого количества связки.

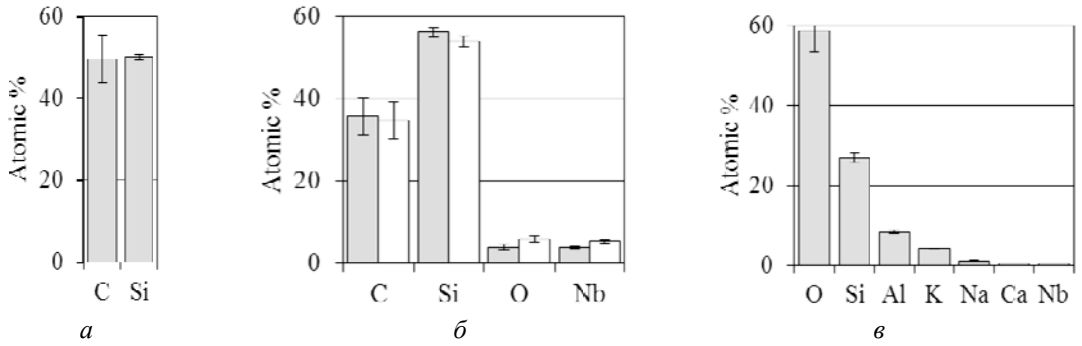


Рис. 4. Химический состав продуктов износа, перенесенный на обработанную поверхность:
а – рис. 3, *б*; *б* – рис. 3, *а,в*; *в* – рис. 2, *г*

Более убедительные результаты, свидетельствующие о присутствии на обработанной поверхности кристаллов керамической связки, получены в результате рентгеноспектрального анализа объекта, представленного на рис. 2, *г* в точке Spot 1. В анализируемой точке объекта содержатся следующие химические элементы: кислород, кремний, алюминий, калий, натрий и кальций (рис. 4, *в*). Концентрация перечисленных химических элементов согласуется со средней концентрацией аналогичных химических элементов в керамической связке К10 [12].

Основные выводы

Морфология обработанной поверхности ниобиевого сплава после шлифования кругом из карбида кремния на керамической связке свидетельствует о интенсивном адгезионно-когезионном взаимодействия инструмента и обрабатываемого материала.

При шлифовании ниобиевого сплава происходит перенос продуктов износа абразивного инструмента на обработанную поверхность. Кристаллические продукты износа абразивного инструмента частично или полностью вдавлены в обработанную поверхность. Размер внедренных объектов изменяется в широком диапазоне от 70 до 1 мкм и меньше. Встречаются и более крупные объекты.

На основе рентгеноспектрального анализа установлено, что продуктами износа абразивного инструмента являются кристаллы абразивного материала (карбид кремния), керамическая связка и их сочетание.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Caron P.* (2007). French Research and Development Activities on High-Performance Superalloys for Gas Turbine Components. Materials Science Forum, 546–549, 1179–1186. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.546-549.1179

2. *Зеликман, А. Н.* Металлургия редких металлов : учебник / А. Н. Зеликман, Б. Г. Коршунов. – М. : Металлургия, 1991. – 432 с.

3. Справочник технолога / под общей ред. А. Г. Суслова. – М. : Инновационное машиностроение, 2019. – 800 с. ISBN 978-5-907104-23-5.

4. *Nosenko S.V., Nosenko V.A., Koryazhkin A.A.* (2018) The Effect of the Operating Speed and Wheel Characteristics on the Surface Quality at Creep-Feed Grinding Titanium Alloys. Solid State Phenomena 284:369-374. DOI: 10.4028/www.scientific.net/SSP.284.369

5. *Guerrini G., Bruzzone A.A.G, Crenna F.* (2017) Single Grain Grinding: An Experimental and FEM Assessment. Procedia CIRP. Vol. 62. P. 287-292. DOI: 10.1016/j.procir.2016.07.082.

6. *Liao Z., Abdelhafeez A., Li H., Yang Y., Diaz O. G., Axinte D.* (2019). State-of-the-art of surface integrity in machining of metal matrix composites. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 143, 63-91. https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2019.05.006

7. *Nosenko V.A., Fetisov F.V., Nosenko S. V., Puzyrkova, V. Ye.* (2020) Morphology and Chemical Composition of Silicon Carbide Surface in Interaction with Titanium Alloy under Micro-Scratching Conditions. MATEC Web of Conf. Vol. 329, 2020. – 10 p. DOI: https://doi.org/10.1051/matecconf/202032902010.

8. *Nosenko V.A., Nosenko S.V.* (2010) Mathematical models of operating time and cutting capacity for various stages of flat creep feed grinding of horizontal surface by circle of direct profile Journal of Machinery Manufacture and Reliability. Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 39(4):380-385. DOI: 10.3103/S1052618810040138

9. *Nosenko V.A., Fetisov F.V., Kuznetsov S.P.* (2020) Transfer of Cubic Boron Nitride Grinding Wheel Wear Products to the Nickel Alloy Surface . MATEC Web of Conf. Vol. 329. – 8 p. DOI: https://doi.org/10.1051/matecconf/202032903050.

10. *Носенко, В. А.* Испытательный комплекс на базе прецизионного профилешлифовального станка с ЧПУ CHEVALIER модели SMART-B1224 III / В. А. Носенко, Р. А. Белухин, А. В. Фетисов, Л. К. Морозова // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 5 (184) / ВолгГТУ. – 2016. – С. 35–39.

11. *Nosenko, V. A., Fetisov, A. V., Puzyrkova, V. Ye.* (2018). Morphology and Chemical Composition of Silicon Carbide Surfaces Interacting with Iron, Cobalt, and Nickel in Microscratching. Solid State Phenomena, 284, 363–368. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/ssp.284.363.

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

УДК 621.9.015
DOI: 10.35211/1990-5297-2021-1-248-31-34

Ж. С. Тихонова, П. А. Чемогонов, Е. М. Фролов, Д. В. Крайнев

СИСТЕМА АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Волгоградский государственный технический университет
E-mail: tikhonovazhs@gmail.com

Предложена адаптивная система, позволяющая анализировать параметры технологического процесса за счет применения датчиков усилия, мощности, крутящего момента. Представлено конструктивное исполнение технологической части предлагаемой системы в виде динамометрической оправки с учетом результатов моделирования и расчета методом конечных элементов в программном пакете SolidWorks.

Ключевые слова: сила резания, механическая обработка, параметры технологического процесса, система адаптивного управления, станок с ЧПУ, оправка.

Zh. S. Tikhonova, P. A. Chemogonov, E. M. Frolov, D. V. Krainev

ADAPTIVE CONTROL SYSTEM OF THE MACHINING PROCESS

Volgograd State Technical University

An adaptive system is proposed that allows analyzing the parameters of the technological process through the use of sensors of force, power, torque. The design of the technological part of the proposed system in the form of a dynamometric mandrel is presented, taking into account the results of modeling and calculation by the finite element method in the SolidWorks software package.

Keywords: cutting force, machining, technological process parameters, adaptive control system, CNC machine, mandrel.

Сила резания, возникающая в процессе механической обработки, является важным параметром процесса резания, поскольку именно она определяет долговечность станка, стойкость режущего инструмента, качество поверхностного слоя обрабатываемой заготовки [1]. Важность контроля (измерения и управления) нагрузки обуславливает ряд факторов: увеличение сил резания в процессе обработки позволяет оценить работоспособность инструмента; зная предельные значения силы резания, возможно обеспечить требуемую точность нежестких (маложестких) деталей; выбирая режимы обработки, можно обеспечить требуемые точность и производительность инструментального материала, которые в том числе зависят от действующих нагрузок на его рабочие поверхности и др., что в совокупности напрямую влияет на производительность и эффективность обработки [1, 2, 3]. В связи с этим, решение задачи, связанной с управлением силой резания для автоматизированного выбора и коррекции режимов резания на токарных станках с ЧПУ, является актуальным направлением исследования.

Авторами предложенаадаптивная система, которая за счет применения датчиков усилия, мощности, крутящего момента позволит анализировать параметры технологического процесса. Закладываемые в систему алгоритмы ориентированы на распознание перегрузки станка по заданным параметрам и своевременную компенсацию их появления обратной связью с ЧПУ станка путем корректировки режимов резания. Преимуществом системы является возможность одновременного регулирования нескольких (скорость, подача) параметров технологического процесса.

Принцип работы предлагаемой системы заключается в следующем: при превышении силовой нагрузки на рабочий орган станка, система ЧПУ получает цифровой сигнал. Специализированная асинхронная управляющая программа станка запускает процедуру адаптивного контроля [4]. Система ЧПУ снижает подачу и/или обороты шпинделя. В случае, если происходит пересечение предела силовой нагрузки в обратном направлении, то параметры резания регулируются в сторону увеличения до достижения исходного состояния. Производится занесение записи в специализированный протокол о событии [5]. Особенностью предлагаемой системы является ее конструктивное исполнение в виде динамометрической оправки.

© Тихонова Ж. С., Чемогонов П. А., Фролов Е. М., Крайнев Д. В., 2021.

На рис. 1 представлен вариант корпуса оправки, хвостовик которой выполнен согласно ГОСТ 24900-81 (DIN69880) для размещения в револьверной голове станков с ЧПУ.

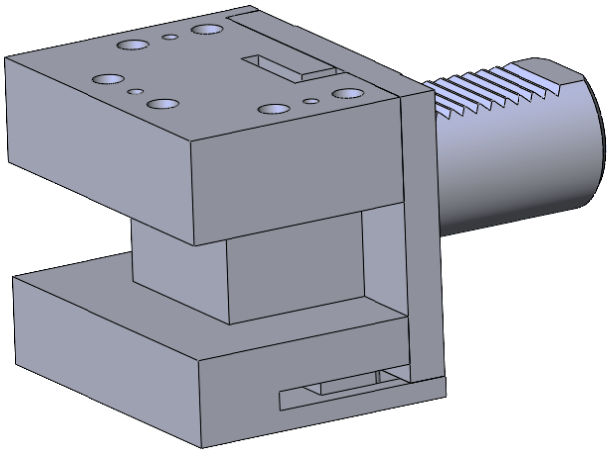


Рис. 1. Корпус динамометрической оправки

При проектировании корпуса оправки использовался программный пакет SolidWorks, который позволяет моделировать твердые тела с последующим их расчетом на прочность, что позволяет в процессе проектирования вносить изменения в конструкцию, учитывая прочностной анализ.

На первом этапе спроектирована геометрия оправки для токарного станка с ЧПУ VDI 40. Оправка имеет специальные герметизированные полости, в которых размещены тензодатчики. Каждая из полостей спроектирована таким образом, что размещенный в ней датчик позволяет снимать показания усилий резания по каждому из направлений *Py*, *Px* и *Pz*.

На втором этапе проведен анализ на прочность, включающий наложение ограничений (фиксацию геометрии, приложение усилий), построение сетки, получение результатов анализа.

Таким образом, конструкция жестко зафиксирована в области хвостовика оправки, имитируя егорасположение в револьверной голове токарного станка с ЧПУ (рис. 2). По каждому из направлений *x*, *y*, *z* приложены усилия *Py*, *Px* и *Pz*, в Ньютонах. При моделировании использовался резец токарный для наружного точения *PDJNR*2020-*K*15.

При проведении эксперимента величина приложения усилий варьировалась для оптимального выбора места расположения измерительных модулей в предлагаемой конструкции.

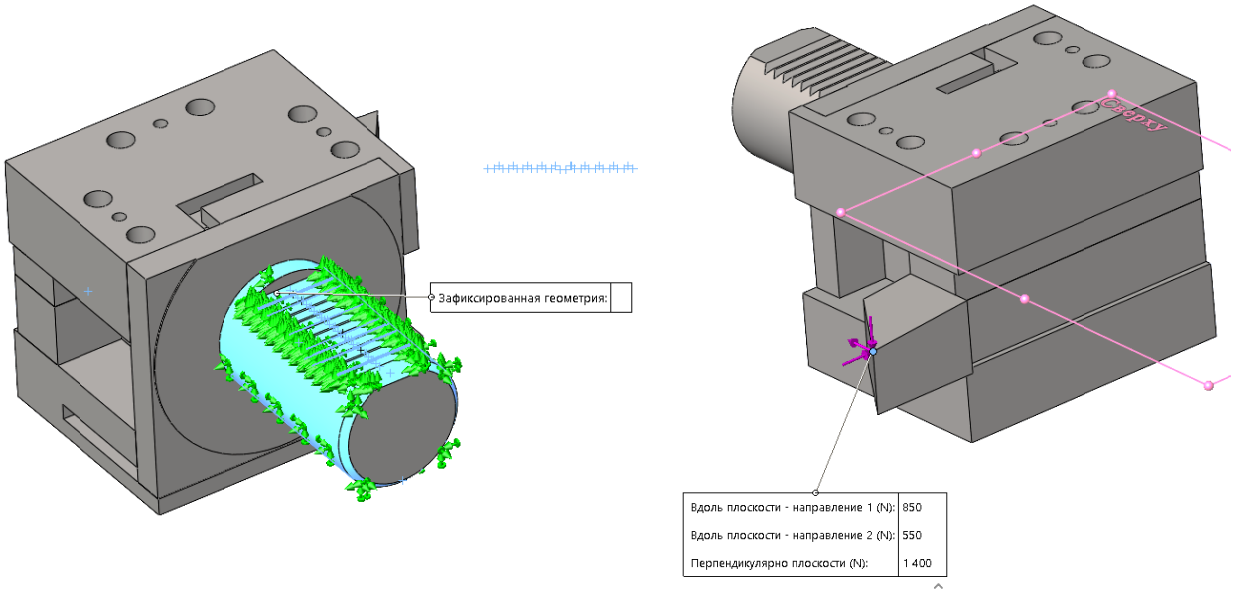


Рис. 2. Расчетная модель оправки

Далее расчетная модель разбивалась на некоторое число геометрических элементов для генерирования конечно-элементной модели (рис. 3).

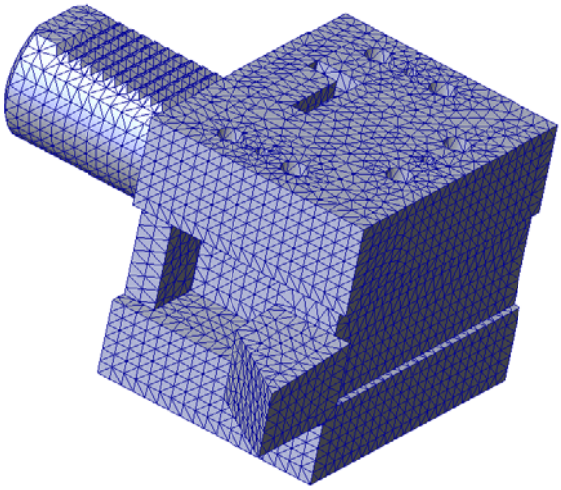


Рис. 3. Конечно-элементная модель оправки

На рис. 4 представлены результаты моделирования.

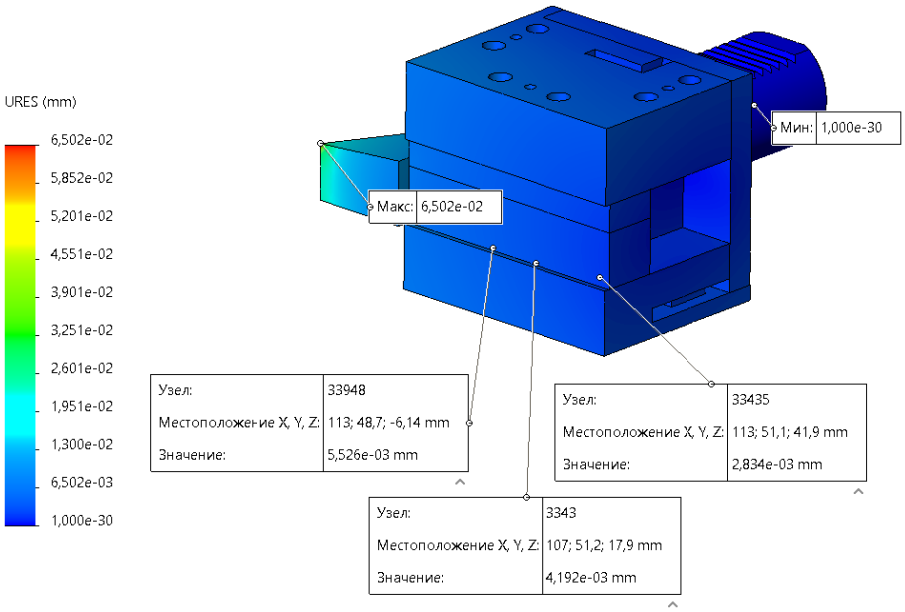


Рис. 4. Результаты моделирования

В результате применения метода конечных элементов установлено, что микроперемещения элементов оправки в зонах предполагаемой установки измерительных модулей достаточны для фиксации сил резания, возникающих при токарной обработке. Таким образом, предлагаемая оправка с функцией измерения силовых параметров процесса резания может стать основой технологической части системы адаптивного управления процессом механической обработки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Безъязычный, В. Ф.* Динамометрическая система для измерения силы резания при точении / В. Ф. Безъязычный, А. В. Кордюков, М. В. Тимофеев, Р. Н. Фоменко // СТИН. – 2014. – № 7. – С. 29–30.

2. *Фролов, Е. М.* Cyber-Physical Machining Systems Based on Commercial CNC Equipment [Электронный ресурс] / Е. М. Фролов, Д. В. Крайнев, Ж. С. Тихонова // 2018 International Russian Automation Conference (RusAutoCon) (Sochi, Russia, 9-16 September, 2018) / Institute of Electrical and Electronics Engineers, South Ural State University (national research university), IEEE Russia Siberia Section, IEEE Russia Section, South Ural IEEE Chapter. – [Publisher: IEEE Xplore], 2018. – 4 p. – DOI: 10.1109/RUSAUTOCON.2018.8501684.

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

4. The reliability improvement of CNC machining centers due to on-line diagnostics of the cutting process [Электронный ресурс] / Д.В. Крайнев, А.С. Сергеев, Ж.С. Тихонова,

Куанг Чонг Нго // 2017 XX IEEE International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM) (St. Petersburg, Russia, 24-26 May 2017) : Conference Proceeding / ed. by S. Shaposhnikov. – [Publisher: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. (IEEE)], 2017. – P. 627-629. – DOI: 10.1109/SCM.2017.7970670.

5. Оперативная диагностика как средство повышения надежности функционирования систем ЧПУ / Д. В. Крайнев, Ж. С. Тихонова, А. А. Кожевникова, Д. С. Дубовова // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 12 (207) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2017. – (Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении»). – С. 18–20.

УДК 621.438-46: 621.921
DOI: 10.35211/1990-5297-2021-1-248-34-38

Е. А. Федянов[1], В. А. Санинский, Н. А. Ушаков[2]

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ДРОССЕЛИРОВАНИЯ В ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ КАНАЛАХ ДОРНУЮЩИХ ПРОШИВОК ДЛЯ ГЛУБОКИХ ОТВЕРСТИЙ

[1] Волгоградский государственный технический университет
[2] Волжский политехнический институт (филиал) ФГБОУ ВО Волгоградский государственный технический университет
E-mail: saninv@rambler.ru

В статье представлена методика расчета характеристик дросселирующих элементов смазывающее-охлаждающей технической среды (СОТС), используемых в деформирующей прошивке. Особенностью предлагаемой методики является способ подачи СОТС под давлением через канавки, выполненные на наружной поверхности дорнующих зубьев, когда давление рабочей среды и ее расход разделяют на параллельные потоки, один их которых обеспечивает давление на прошивку при дорновании отверстия с нормируемой скоростью в ее осевом перемещении, а второй обеспечивает расчетные параметры дросселирования между поверхностью канавок на дорнующих зубьях и обрабатываемой поверхностью, где они создают «демпфирующие подушки», улучшая процесс дорнования и снижая износ прошивок [3]

Представленный расчет характеристик (давления СОЖ, расхода и т. д) при расположении условных камер, образованных канавками дорнующих зубьев и обрабатываемой поверхностью, подтверждает возможность реализации с помощью дросселей условий применения элементов дросселирования при режуще-деформирующем прошивании глубоких отверстий в длинномерных трубных заготовках и повышения на этой основе его эффективности.

Ключевые слова: методика, расчет, характеристики, дросселирующие элементы, смазывающее-охлождающей технической среда, деформирующая прошивку, пластическая деформации, снижение износа, обработка, глубокие отверстия.

E. A. Fedyanov[1], V. A. Saninsky, N. A Ushakov[2]

CALCULATION OF THROTTLEMENT PARAMETERS IN PARALLEL CHANNELS OF DRILLING PIPERS FOR DEEP HOLE

[1] Volgograd State Technical University,
[2] Volzhsky Polytechnic Institute (branch)
Volgograd State Technical University

The article presents a method for calculating the characteristics of the throttling elements of the lubricating-cooling technical medium (COTS) Yu used in deforming piercing. A feature of the proposed technique is the method of supplying cutting fluids under pressure through the grooves made on the outer surface of the mandrel teeth, when the pressure of the working medium and its flow rate are divided into parallel flows, one of which provides pressure on the piercing when the hole is mandrelled with a normalized speed in its axial movement the second provides the calculated parameters of throttling between the surface of the grooves on the mandrel teeth and the machined surface, where they create "damping cushions", improving the mandrel process and reducing wear of the piercing [3].

The presented calculation of the characteristics (coolant pressure, flow rate, etc.) with the location of the conditional chambers formed by the grooves of the punching teeth and the processed surface confirms the possibility of using throttles to implement the conditions for using throttling elements during cutting-deforming piercing of deep holes in long tube blanks and increasing by this basis of its effectiveness.

Keywords: methods, calculation, characteristics, throttling elements, lubricating-cooling technical environment, deforming firmware, plastic deformation, wear reduction, machining, deep holes.

© Федянов Е. А., Санинский В. А., Ушаков Н. А., 2021.

При осуществлении обработки глубоких отверстий (ГО) методом деформирующего прошивания [1] на параметры отверстий точности и шероховатости значительное влияние оказывают взаимосвязь между геометрическими параметрами дорнующих элементов прошивки, их количеством, числом ее рабочих ходов N [3], натягом iд, назначаемый при проектирование прошивки на каждый ее дорнующий зуб [1]. При пришивании возможны два способа осуществления силы дорнования: первый способ осуществим через механический через шток винтового пресса (рис. 1) [1] и второй – гидравлический через усилие рабочей среды, например машинного масла (рис. 2) [2]. Второй способ может иметь разновидности разделения гидравлических потоков – на два потока, когда один обеспечивает давление на прошивку для создания нормируемой скорости в ее осевом перемещении и второй поток, обеспечивающий расчетные параметры дросселирования между поверхностью канавок на дорнующих, улучшающий процесс дорнования и снижая износ прошивок (рис. 2) [3]

При втором способе возможно разделение исходного потока на три параллельных, один из которых также обеспечивающий расчетные параметры дросселирования между поверхностью канавок на дорнующих, улучшающий процесс дорнования и снижая износ прошивок, а два параллельных направлены на обеспечение работы турбин [3].

Примера конкретного применения способа.

Обработка трубной заготовки с толщиной стенки 4,5 мм с достижением диаметра 60Н7 и параметра шероховатости Ra 0,4 ГО в условиях применения процесса совмещения вихрефрезерования с дорнованием многозубым дорном при соотношении диаметра D и толщины S стенки трубы D/S>0,05.

I. Пример расчета осевой силы при прошивании отверстия 60Н7(+0,03) Ra0,63 с наружным диаметром втулки D=90 мм, l=100 мм, выполненной из стали 45 [2]. Прошивание осуществляется 4-х зубом дорном zв=4, позволяющим получать Ra 2, 5 мкм. Такие геометрические параметры идентичны заложенным в конструкции протяжки, представленной в источнике [3].

Материал дорнующего блока ВК8, скорость выглаживания не более 9 м/мин, охлаждение – сульфафрезол. Размеры в обрабатываемой заготовке пустотелого дорнующего блока: наружный диаметр 60,8+1.5, с посадочным отверстием 30, 4 -1,2 мм, с шагом между зубьев lн=10 мм, тогда общая длина Lн = lнх4 = 40 мм.

Определены натяг каждого выглаживающего зуба и окончательно получены шлифованием заготовок с диаметра 60,8+1.5 до нужных диаметры дорнующих зубьев в назначенной заготовке в соответствии со следующими расчетными значениями натягов.

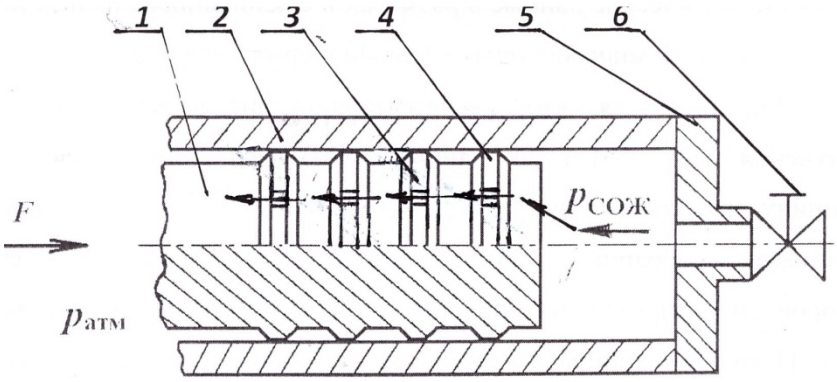


Рис. 1. Схема подачи СОЖ к дорнующим зубьям со стороны обрабатываемого отверстия:
1 – шток прошивного станки или гидропресса; *2* – обрабатываемая деталь; *3* – канавка дросселирующего элемента; *4* – дорнующий зуб дорна; *5* – торцевая заглушка на обрабатываемой детали *2*; *6* – дроссель торцевой заглушки *5*

На рис. 2 приняты следующие обозначения: *1* – режуще-деформирующий зуб прошивки; *2* – дорнующие черновые зубья, создающие предварительный размер глубокого отверстия; *3* – дорнующие чистовые зубья прошивки, создающие окончательный размер глубокого отверстия; *4* – средняя деформирующая часть прошивки; *5* – трубная заготовка; *6* – элементы гидравлических камер, образованных боковыми конусными поверхностями зубьев прошивки

и поверхностью ГО; *7* – глубокое отверстие трубной заготовки *5*; *8* – общий трубопровод магистрали рабочей среды; *9* – кран реверсивный; *10* – трубопровод, ведущий к обрабатываемой поверхности ГО от общего трубопровода 8 магистрали рабочей среды; *11* – дроссели; *12* – радиальный канал; *13, 14* – осевые каналы; N-1, N-2, N-3 – условные камеры с шагом *10* мм, образованные кольцевыми канавками и расположенные между дорнующими зубьями; I, II, III – условные камеры с шагом 19 мм, образованные кольцевыми канавками и расположенные между дорнующими зубьями [2].

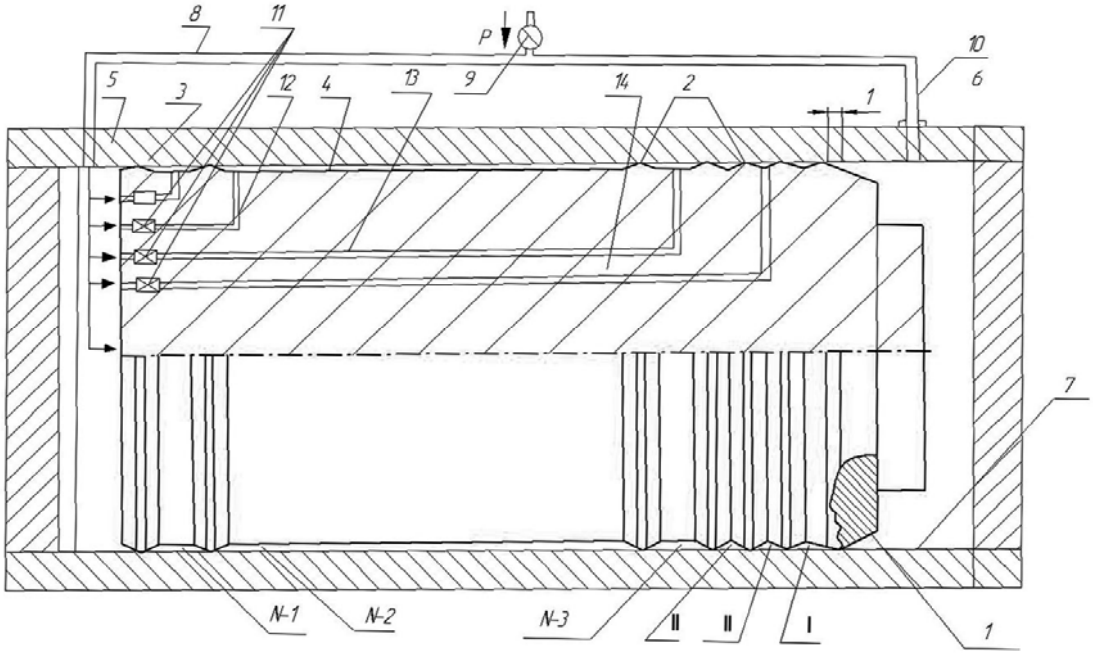


Рис. 2. Схема прошивки с элементами дросселирования

Такой подход позволяет создать условия для увеличения стойкости и точности обработки ГО.

Способ механической обработки ГО в трубной заготовке, при котором обработку осуществляют борштангой с режущим инструментом, помещенным в прошивку, представлен в статье [2, 4–9].

При осуществлении обработки методом деформирующего прошивания деформированием ГО на параметры точности и шероховатости значительное влияние оказывают геометрические параметры дорнующих элементов, их количество n на прошивке, число ее рабочих ходов N [2] в обрабатываемом отверстии и натяг i.

Параметры щелевой канавки: высота 0,0005 м, ширина 0,007 м, скорость движения дорна относительно стенки трубы 1 м/мин, длина потока в щели 1 мм х 12 = 12 мм, используемая СОЖ – масло, динамическая вязкость СОЖ 12,6 МПА·с; количество щелей в дорнующем зубе 4 (или подбирается так, чтобы было кратно 4-м), давление СОЖ в полости трубы $P_{60} \sum B60$ =364440 (Н) (оно может быть заменено давление СОЖ в 121,5 МПа), давление среды (атмосферное) P=0,1 МПа.

Устройство для совмещенной обработки ГО состоит из дорнующей прошивки, инструментальной борштанги и поворотной промежуточной втулки для осуществления планетарного движения инструментальной борштанги. В рассматриваемых примерах технология прошивания предусматривает в процессах дорновании толкающую силу, прикладываемую к дорну (аналогично тянущую).

При натяге i = 1,4 мм, когда в работе будет находиться 12 дорнующих зубьев, т. е дорн будет иметь три блока по 4 зуба в каждом, величина осевой силы не превысит предел $F= P_{60} \sum B60$

$$P_{60} \sum B60=121480 \text{ x}3= 364440 \text{ (Н)}.$$

Тогда, чтобы СОЖ не препятствовала движению дорна, необходимо обеспечить ее утечку через щели с определенным давлением

($P_{сож}$) (см. рис. 2). Одновременно, конструктивным изменением расчетного числа щелей или их площади, обеспечивается параметр Vд = So= (1.... 9) м/мин, и тогда скорость Vд равна величине осевой подачи дорна So вдоль оси ГО за 1 минуту. Это же количество СОЖ оказывается и вытесненным из полости условного гидроцилиндра длиной 1м(п.у.г.ц.1) через канавки 3 дросселирующих элементов в сторону толкателя (рис. 1).

Q п.у. г.ц 1= (1м) πD1²/4 =
= (1000 x3,14 x 60²/ 4) =
= 11 304 000 мм³ =0,013 м³

Зная величину силы P_{60} ∑ B60=121480 x3= = 364440 (Н), необходимой для осуществления дорнования ГО диаметром 60 Н7, имеющего перед обработкой припуск 0,9=1,4; мм, необходимо установить давление $p_{СОЖ}$, которое необходимо создать для перетекания СОЖ из обрабатываемой полости ГО в отработанную.

Скорость перемещения дорна (резания) может быть выражена через параметры давления $\Delta p_д$ и геометрические параметры δ и b дросселирующих элементов щелей и обрабатываемого отверстия через следующую зависимость

$$V_Д = \frac{2}{\delta b}\left(\frac{\delta b \cdot \Delta p_д}{12\mu L} - \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot L_0 \cdot N\right), \qquad (1)$$

где $V_д$ – скорость движения дорна относительно стенки трубы, δ – высота щели (0,0005 м), b – ширина щели (0,007 м), L – длина потока в щели (1 мм x 12 = 12 мм), μ – динамическая вязкость СОЖ (12,6 МПА·с), N – число щелей в дорнующем зубе (4 или кратное 4), $\Delta p_д$ – перепад давлений при продавливании СОЖ через щели зуба, L_0 – длина обрабатываемого отверстия (L_0 = 1 м.). При этом значения регулируют на величину перепада давления $\Delta p_д$ при продавливании СОЖ через щелевые канавки зуба в зависимости от режимов резания, что позволяет снизить процессы образования нароста на дорнующих зубьях и задиров на обработанной поверхности.

Найдем значение перепада давлений при продавливании СОЖ через щели зуба:

$$\Delta p_д = \frac{p_{СОЖ} - p_{атм}}{N_д} \qquad (2)$$

где $P_{СОЖ}$ – давление СОЖ в полости трубы P_{60} =364440 (Н) (оно может быть заменено давление СОЖ в 121,5 МПа), $P_{атм}$ – давление среды (атмосферное) $P_{атм}$ =0,1 МПа, $N_Д$ – число щелей в дорнующем зубе $N_Д$=4.

Используем следующие исходные данные.

Параметры щелевой канавки: высота 0,0005 м, ширина 0,007 м. Определим скорость движения дорна относительно стенки трубы, если длина потока в щели 1 мм x 12 = 12 мм, используемая СОЖ – масло, динамическая вязкость СОЖ 12,6 МПА·с; количество щелей в дорнующем зубе 4 (или подбирается так, чтобы было кратно 4-м), давление СОЖ в полости трубы P_{60} ∑ B60 =364440 (Н) (оно может быть заменено давление СОЖ в 121,5 МПа), давление среды (атмосферное) P=0,1 МПа.

Подставив численные значения в формулу (3), получим:

$$\Delta p_д = \frac{121,5 - 0,1}{4} = 30,4 МПа, \qquad (3)$$

Зная перепад давлений при продавливании СОЖ через щели зуба, используя формулу (1), найдем значение $V_Д$:

$$V_Д = \frac{2}{0,5 \cdot 10^{-3} \cdot 7 \cdot 10^{-3}} \cdot \left(\frac{0,5 \cdot 10^{-3} \cdot 7 \cdot 10^{-3} 30,4 \cdot 10^6}{12 \cdot 12,6 \cdot 10^6} - \frac{3,14 \cdot (6 \cdot 10^{-2})^2}{4} \cdot 1 \cdot 4\right) = 0,02 м/сек = 1,2 м/мин$$

Выводы

1. Зная давление P и требуемый расход $Q_ж$ СОЖ, можно подобрать значения площади сечения каналов для дросселирования при переходе из ее передней, подводящей жидкость в части в заднюю камеру, и давление, которое необходимо поддерживать перед этими каналами для обеспечения нужной скорости дорнования.

2. Требуемый расход $Q_ж$ и скорость перемещения жидкости из передней условной камеры в заднюю определяет скорость движения прошивки $V_д$ в процессе режуще-деформирующего прошивания ГО и зависит от режимов резания, геометрических параметров прошивки, от расхода СОЖ и параметров СОТС.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Санинский, В. А.* Расчет параметров дросселирования каналами дорнующих элементов прошивок / В. А. Санинский, Е. А. Федянов, Е. Н. Нестеренко // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 2 / ВолгГТУ. – Волгоград, 2020. – (Серия «Прогрессивные технологии»).

2. *Санинский, В. А.* Обоснование расширения возможностей режуще-деформирующего прошивания глубоких отверстий при ремонте машин сельскохозяйственного назначения / В. А. Санинский, А. В. Грибенченко, Е. Н. Смирнова // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. – 2019. – № 1 (53). – С. 284–293.

3. Протяжки для обработки отверстии / Ж. К. Маргулис, М. М. Тверской, В. Н. Ашихмин [и др.]. – М. : Машиностроение, 1986. – 232 с., с ил. –(Б-ка инструментальщика).

4. Пат. 2563401 РФ, МПК B23B35/00. Способ механической обработки глубокого отверстия в трубной заготовке / В. А. Санинский, В. В. Ананян, Е. Н. Осадченко, А. В. Санинский, Д. Н. Творогов; ВолгГТУ. – 2015.

5. Пат. 2552616 РФ, МПК B23B41/00, B23D79/00, B23B1/00, B23C3/00. Способ механической обработки глубокого отверстия в трубной заготовке / В. А. Санинский, В. В. Ананян, Е. Н. Осадченко, А. В. Санинский, Д. С. Михайлов ; ВолгГТУ. – 2015.

6. *Санинский, В. А.* Разработка и применение фрезерно-расточных станков с механизмом планетарного движения режущего инструмента : монография / В. А. Санинский ; ВПИ (филиал) ВолгГТУ. – Волгоград, 2016. – 110 с.

7. П. м. 143938 РФ, МПК B23B41/02. Устройство для механической обработки глубоких отверстий / В. А. Санинский, В. В. Ананян, Е. Н. Осадченко, А. В. Санинский ; ВолгГТУ. – 2014.

8. *Санинский, В. А.* Совершенствование технологии обработки трубных заготовок / В. А. Санинский // Вестник машиностроения. – 2016. – № 7. – С. 73–76.

9. Inproving the use jf lubricfnd fnd cjjlant fluida in machining/ A, V Shchedrin? F. F. Bekaev. V, M. Skoromnv et al // Russian Engineering Restarch. Nef Vork; Allerton press, 2006, Vol. 26. № 10. З 38-39.

УДК 681.5
DOI: 10.35211/1990-5297-2021-1-248-38-41

Е. М. Фролов, А. В. Рогачев, В. Г. Фадеев, С. С. Семеняка

АДАПТАЦИЯ МЕТОДА УПРАВЛЕНИЯ РЕЖИМАМИ РЕЗАНИЯ К ПРОМЫШЛЕННЫМ УСЛОВИЯМ

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

Рассматриваются варианты реализации устройства с возможностью применения метода пробного прохода в промышленных условиях для автоматического определения режимов резания путем фиксации взаимных свойств контактной пары инструмент – обрабатываемый материал через величину термоЭДС, возникающей при механической обработке.

Ключевые слова: метод пробного прохода, термоЭДС, сборный токарный резец, режимы резания.

E. M. Frolov, A. V. Rogachev, V. G. Fadeev, S. S. Semenyaka

ADAPTATION OF THE METHOD OF CONTROLLING CUTTING MODES TO INDUSTRIAL CONDITIONS

Volgograd State Technical University

Variants of devices with the possibility of using the test pass method in industrial conditions for automatic determination of cutting modes by measuring the mutual properties of the tool – material contact pair through the value of the thermal EMF that occurs during machining are considered.

Keywords: test pass method, thermal EMF, composite lathe cutter, cutting conditions.

Производительность металлорежущего оборудования, точность обработки, качество получаемой поверхности и другие характеристики процесса резания напрямую зависят от выбора режимов резания. Следовательно, назначение рациональных режимов обработки является одной из важнейших задач производства.

На сегодняшний день существует множество различных методик определения рациональных режимов резания, но в реальном производстве практикуется их назначение в соответствии с нормативными данными. В то же время производственные условия, как правило, отличаются от нормативных. Сказывается влияние большого количества факторов от состояния станка до разброса свойств обрабатываемого и инструментального материалов. Учет реальных производственных условий обеспечивается оператором на рабочем месте. Задача существенно осложняется в условиях применения новых материалов инструмента и заготовки, а также в нетипичных производственных условиях, то есть когда нормативные данные отсутствуют или не полные. К тому же, в условиях все более глубокого внедрения технологий «Индустрии 4.0», задача автоматизации процес-

© Фролов Е. М., Рогачев А. В., Фадеев В. Г., Семеняка С. С., 2021.

са назначения и уточнения режимов резания непосредственно на рабочем месте становится все актуальнее. Возможность ее решения становится реальной в связи с оснащением станков все более мощными системами ЧПУ.

Для повышения надежности назначения режимов резания при токарной обработке в современном машиностроении применяют адаптивные системы. Под надежностью назначения режимов резания понимается способность инструмента осуществлять резание с заданными параметрами получаемой поверхности в течение заложенного при расчете периода стойкости. Существуют способы нахождения оптимальных по некоторым критериям скорости резания и подачи, которые могли бы применяться в адаптивных системах. Например, способ определения оптимальной скорости резания, основанный на том, что наибольшей скорости режущего инструмента соответствует минимальная длина участка упрочнения [1]. Также существует способ определения оптимальной скорости резания, основанный на нахождении последней по выбранному исходному параметру, связанному с изменениями характеристик кристаллической решетки [2]. Описанные способы предполагают получение предварительной информации о свойствах инструмента или стальной заготовки, что всегда полезно, но не решает задачи оперативного, непосредственно на станке, получения информации о каждой контактной паре. Те же способы, что позволяют оперативно получить значения режимов обработки по информации из зоны резания трудоемки и, главное, не поддаются автоматизации. Таким образом задача состоит в том, чтобы непосредственно на станке предварительно, перед началом резания, получить информацию о физико-механических свойствах каждой контактной пары и на ее основе назначать (корректировать) режимы обработки.

Проблема заключается в том, что зона резания не позволяет встраивать в нее какие-либо датчики для прямого измерения. Из всех существующих способов получения информации из зоны резания о свойствах контактной пары доступными для автоматизации являются термоэлектрические способы, где допустимую скорость резания и подачу предлагается определять, опираясь на информацию о значении величины термоЭДС пробного прохода [3, 4, 5]. Рассматриваемый способ определения скорости резания осуществляется следующим образом. Предварительно, на режимах пробного прохода, не связанных с технологическими режимами, но исключающими вибрацию и наростообразование, например v = 100 м/мин, S = 0,1 мм/об, t = 1 мм, проводят обработку заготовки рабочим резцом. Во время предварительной обработки в соответствии с методикой измеряется величина сигнала термоЭДС, выступающая в качестве интегрального показателя оценки физико-механических свойств контактируемых материалов заготовки и инструмента, а также условий протекания процесса резания. Для осуществления указанного метода в промышленных условиях требуется минимальное вмешательство в конструкцию оборудования и обеспечение надлежащей жесткости технологической системы. Авторами предлагаются варианты реализации устройства для работы в адаптивных системах назначения режимов резания на станках с ЧПУ, на которые оформлены заявки на полезные модели и получены положительные решения о выдаче патента.

Принцип работы устройства основан на использовании автономного модуля для измерения ЭДС резания в виде сборного резца, состоящего из державки со сменной режущей пластиной, изолированной от державки посредством прокладок, а также проводника для подключения в измерительную цепь, которая расположена в державке. Применение прокладки, стальных пластин и рычага, покрытых диэлектрическим износостойким покрытием из корунда (оксида алюминия Al_2O_3), обеспечивает электроизоляцию режущей пластины [6, 7], тем самым позволяя использовать измерительную систему на станке. Кроме этого, отсутствие дополнительных электроизоляционных прокладок, размещенных между резцедержателем и резцом, позволяет повысить жесткость измерительной системы.

Устройство работает следующим образом. Резец сборный *1* (рис. 1) для измерения ЭДС резания устанавливают в резцедержателе станка. Заготовку устанавливают в шпинделе станка. При контакте сменной режущей пластины *3* с заготовкой цепь замыкается. Для измерения ЭДС резания в измерительную цепь включен гальванометр *15*.

В процессе резания в измерительной цепи, образованной за счет электроизоляции сменной режущей пластины *3* прокладкой *6* и стальными пластинами *7*, покрытыми диэлектрическим износостойким покрытием из корунда, а также

электроизоляции рычага *4*, вследствие нагрева в зоне резания возникает термоЭДС. Величина термоЭДС возникающая на поверхностях сменной режущей пластины *3* регистрируется гальванометром *15*, подключенным к сменной режущей пластине *3* посредством проводника *10*, присоединенного к подпружиненному контакту *9*.

Благодаря источнику питания *19*, гальванометра *15*, модуль обработки сигнала *16* и приемо-передающий радио-модуля *17* получают энергию для процесса преобразования показания с гальванометра *15* и передают их с помощью антенны *18* на блок управления и сбора информации (на рис. не показаны).

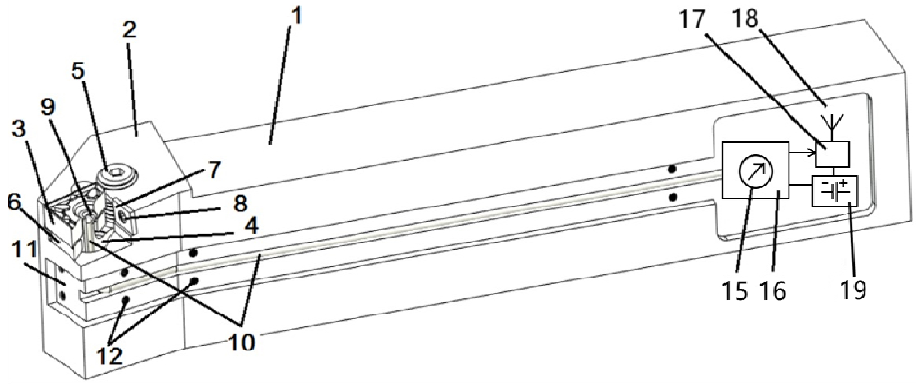


Рис. 1. Автономный модуль для измерения ЭДС резания

Второй вариант устройства предполагает упрощенный подход к передаче данных между термоэлектродом, расположенном в державке и измерительной цепью. Принцип его работы заключается в следующем. Резец сборной конструкции *1* (рис. 2, 3) устанавливают в резцедержателе станка. Заготовку *2* устанавливают в шпинделе станка. Резец сборной конструкции *1* подсоединяют к гальванометру *12* посредством проводника. В процессе резания в измерительной цепи, образованной за счет электроизоляции сменной режущей пластины *4* прокладкой *7* и стальными пластинами *8*, покрытыми диэлектрическим износостойким покрытием Al_2O_3, а также электроизоляции рычага *5*, вследствие нагрева в зоне резания возникает термоЭДС. Величина термоЭДС возникающая на поверхностях сменной режущей пластины *4* регистрируется гальванометром *12*, подключенным к сменной режущей пластине *4* посредством проводника *11*, присоединенного к подпружиненному контакту *10*.

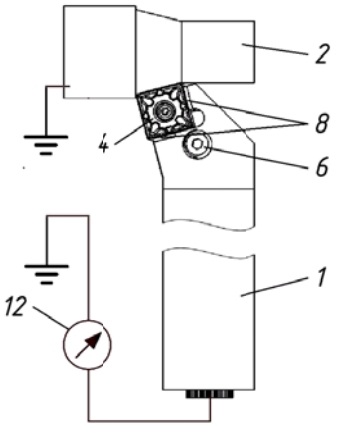


Рис. 2. Подключение токарного резца в измерительную цепь

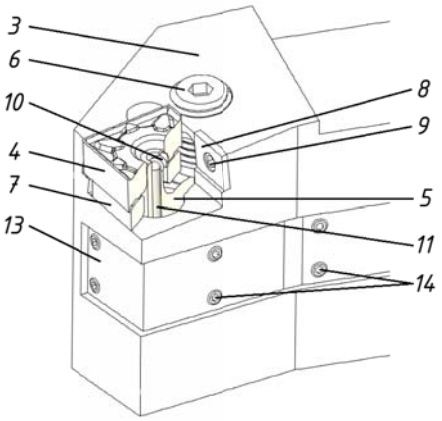


Рис. 3. Конструктивные элементы головки державки резца

Оба модуля для измерения ЭДС резания адаптированы к промышленному применению метода пробного прохода для автоматического управления режимами резания за счет повышения жесткости и надежности измерительной системы, а также упрощения ее обслуживания и возможности использования сменных режущих пластин без модификации.

Использование в предлагаемых разработках величины термоЭДС пробного прохода повышает точность определения значения допустимых режимов резания, так как термоЭДС используется в качестве источника оперативной информации о физико-механических (теплофизических) свойствах контактируемой пары и упрочненного состояния срезаемых объемов стали. Данный метод можно применять как в условиях автоматизированного производства для назначения режимов обработки непосредственно на станке с ЧПУ (при условии наличия соответствующего модуля в структуре системы управления), так и на стадии технологической подготовки производства в модуле расчета режимов обработки САПР ТП.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. А. с. 841779 СССР, МПК^5 В 23 В 1/00. Способ определения оптимальной скорости резания / А. И. Хватов, А. И. Тананин, В. В. Никулин ; заявители Ижевский завод тяжелых бумагоделательных машин, Ижевский механический институт. – № 2832671 ; заявл. 29.10.1979 ; опубл. 30.06.1981, Бюл. № 24.

2. А. с. 1028427 СССР, МПК^5 В 23 В 1/00. Способ определения оптимальной скорости резания / В. Я. Крючков, М. Д. Узунян, В. Ф. Дрожжин ; заявитель Харьковский филиал головного специального производственного конструкторско-технологического бюро по рациональному применению режущего инструмента. – № 3358010 ; заявл. 27.11.1981 ; опубл. 15.07.1983, Бюл. № 26.

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

4. *Фролов, Е. М.* Повышение надежности определения режимов резания в САПР ТП механической обработки : дис. ... канд. техн. наук: 05.03.01. : защищена 12.11.09 / Фролов Е. М. ; ВолгГТУ. – Волгоград, 2009 – 16 с.

5. *Фролов, Е. М.* Cyber-Physical Machining Systems Based on Commercial CNC Equipment [Электронный ресурс] / Е. М. Фролов, Д. В. Крайнев, Ж. С. Тихонова // 2018 International Russian Automation Conference (RusAutoCon) (Sochi, Russia, 9-16 September, 2018) / Institute of Electrical and Electronics Engineers, South Ural State University (national research university), IEEE Russia Siberia Section, IEEE Russia Section, South Ural IEEE Chapter. – [Publisher: IEEE Xplore], 2018. – 4 p. – DOI: 10.1109/RUSAUTOCON.2018.8501684.

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

7. *Фролов, Е. М.* Особенности датчиков для промышленного применения методов оперативного контроля и управления процессом резания / Е. М. Фролов, В. Г. Гусев, Э. А. Корзун // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 7 (217) / ВолггТУ. – Волгоград, 2018. – (Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении»). – С. 66–69.

УДК 621.9; 519.246.85
DOI: 10.35211/1990-5297-2021-1-248-41-44

Ю. Л. Чигиринский, А. В. Евтюнин, В. О. Харламов

КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА СТАБИЛЬНОСТИ ПРОЦЕССОВ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

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

На основании анализа нормативно-технической документации, регламентирующей вопросы управления качеством продукции в машиностроении, установлена неоднозначность содержания термина «стабильность» процессов механической обработки в условиях перехода к построению цифровых производств. Показано, что количественной оценкой стабильности процессов, находящихся в состоянии статистической управляемости, может быть критерий Фишера.

Ключевые слова: точность, стабильность, статистическая управляемость процесса, механическая обработка, точность, статистическое моделирование.

Ju. L. Tchigirinsky, A. V. Evtiynin, V. O. Kharlamov

MECHANICAL TREATMENT'S STABILITY QUANTITATIVE ASSESSMENT

Volgograd State Technical University

The ambivalence of the content of the term «stability» of machining processes in the transition to the construction of digital production is established based on the analysis of regulatory and technical documentation regulating the issues of product quality management in mechanical engineering. It is shown that the Fisher criterion can be a quantitative assessment of the stability of processes that are in a state of statistical controllability.

Keywords: accuracy, stability, statistical controllability of the process, mechanical processing, accuracy, statistical modeling.

© Чигиринский Ю. Л., Евтюнин А. В., Харламов В. О., 2021.

Реализация концепции «Индустрия 4.0», заявленная в программных документах Национальной Технологической Инициативы», предполагает широкое внедрение цифровых производственных систем в современных механообрабатывающих производствах. Основной целью такой модернизации является интенсификация производства при сохранении, а чаще, при повышении, требований к качеству продукции. Процедуры сертификации производства и проверки СМК предприятия требуют проведения оценки точности, стабильности, настроенности технологических процессов.

Отметим, что в настоящее время нет однозначного определения «стабильности» применительно к технологическим процессам или отдельным методам механической обработки. Существует несколько терминов, используемых для определения близких по смыслу понятий: точность – «неизменность во времени степени соответствия параметров готового изделия параметрам, заданным на чертеже изделия» [4] или «сохранение параметров выпускаемых изделий в допустимых пределах в процессе изготовления всей партии» [5]; стабильность – «свойство технологического процесса, обусловливающее постоянство распределений вероятности его параметров в течение некоторого интервала времени без вмешательства извне» [3, 4]. Практически все эти трактовки, в той или иной мере, являются перифразом «надежности» [1] – «свойства ... сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции ...».

Дальнейшие рассуждения проведем в отношении точности размеров, получаемых в результате механической обработки, но заметим, что аналогичные выводы могут быть сделаны в отношении любых других показателей качества изделия – макро- и микрогеометрических характеристик обработанных поверхностей, физико-механических характеристик поверхностного слоя и т. д.

Традиционные [2, 3, 4, 6, 7] подходы к статистическому анализу неизменности во времени значений показателей точности обработки сводятся к расчету среднего значения настроенного размера и стандартного отклонения, как оценки совокупного влияния различных погрешностей. При этом, в качестве аксиомы принимается, что распределение размеров в каждой частной выборке подчиняется закону нормального [4, раздел 3] распределения. Далее нормативные документы [2, 3, 4] рекомендуют оценить, относительно ширины (δ) поля допуска:

– выполнение «правила шести сигма» (коэффициент точности) $\frac{6S}{\delta}$; (1)

– смещение среднего значения (коэффициент настроенности) $\frac{\bar{x} - x_{\delta}}{\delta}$; (2)

– постоянство стандартного отклонения (коэффициент стабильности) $\frac{S_{t1}}{S_{t2}}$; (3)

где S, S_{t1}, S_{t2} – стандартное отклонение совокупной выборки и частных выборок в моменты времени t_1 и t_2; $\bar{x}$, x^{δ} – среднее значение и середина поля допуска, соответственно.

Нормируемые значения для рассчитываемых коэффициентов (1..3) жестко не устанавливаются. Как правило, окончательное заключение о стабильности технологии принимается службой технического контроля на основании субъективного мнения специалиста.

В качестве промежуточных выводов отметим следующее:

1. Отсутствует, применительно к процессам и технологиям механической обработки, единое, закрепленное в нормативных документах, понятие «стабильность»; также, в нормативных документах, отсутствуют рекомендуемые численные нормы показателей стабильности; объективная количественная оценка стабильности невозможна.

2. Гипотеза о нормальном законе распределения значений размеров, отклонений или иных количественных показателей качества обработки в пределах поля допуска, корректна только в случае большого объема выборки, т. е., в условиях крупносерийного или массового производства; в современном машиностроении преобладающим способом организации является производство мелкосерийное; в условиях современного механообрабатывающего производства критерии оценки стабильности, как правило, не приемлемы.

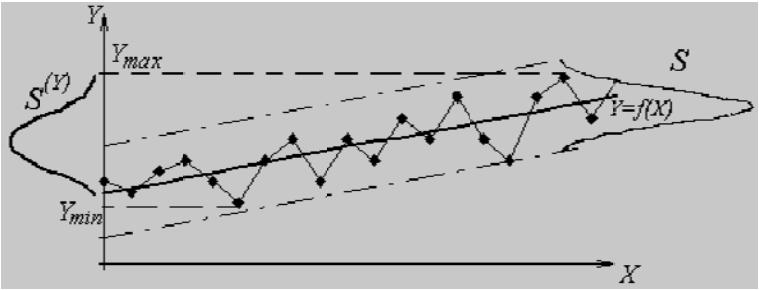
3. Рекомендуемые для оценки стабильности технологического процесса численные характеристики не учитывают возможности закономерного изменения среднего значения; при проведении статистического анализа все погрешности считаются случайными; оценка стабильности обработки на оборудовании с адаптивными системами управления дает некорректные результаты.

При оценке стабильности отдельно рассматриваемого технологического перехода в качестве количественного критерия можно рассматривать коэффициент вариации (4) – статистическую характеристику, малочувствительную к закону нормального распределения и, вследствие этого, применимую для оценки стабильности (однородности, по У. Шухарту [9]) процесса.

$$V = \frac{S}{\bar{x}} \qquad (4)$$

$V \le 0.17$	высокая однородность	процесс стабильный
$V \in \left]0.17; 0.33\right]$	удовлетворительная однородность	
$V > 0.33$	неоднородность	процесс нестабильный

Отметим, что оценка нормально распределенных выборочных совокупностей большого объема по коэффициенту вариации показывает хорошую сходимость [7] с общепринятыми критериями стабильности – при $V \le 0.33$ интегральная вероятность, рассчитанная для нормального распределения, $\Phi \ge 0.9973$, что соответствует стабильному процессу.



Частично детерминированный процесс

Если рассматривать процессы обработки с выраженным детерминированным характером (изображены на рисунке), то традиционный подход к оценке стабильности не позволит получить достоверные результаты.

В этом случае нужно следовать рекомендациям [2], в соответствии с которыми стабильным называют «процесс, каждый показатель качества которого находится в состоянии статистической управляемости». В качестве показателей качества процесса (представлен на рисунке) рассматриваются не только статические характеристики (среднее значение, стандартное отклонение $S^{(Y)}$ по выборочной совокупности), но и «динамические» (закономерно изменяющееся среднее, стандартная ошибка модели S) [8]. Количественной оценкой стабильности, в этом случае, можно считать критерий Фишера [8].

Покажем возможность оценки стабильности по критерию Фишера на следующем примере.

Выборочная совокупность из 120 значений получена при измерении в шести сечениях 20 деталей, обработанных за период стойкости инструмента. Стандартное отклонение выборки составило $S^{(Y)} = 0,017$ мм при заданной ширине поля допуска 0,062 мм. Соответственно, коэффициент точности (1) равный $6 \cdot 0,017 / 0.062 = 1,64$ показывает, что процесс обработки является нестабильным. При моделировании процесса токарной обработки размер изделия был описан степенной регрессионной зависимостью вида $d = d_0 + a \cdot n^b$, где d – ожидаемое значение размера n-й детали, d_0 – номинальное значение размера: $d = 42 + 0.08 \cdot n^{-0,11}$. Стандартная ошибка модели, с учетом выделенной закономерности, $S = 0,007$ мм. Коэффициент точности, рассчитанный по величине стандартной ошибки модели, составляет $6 \cdot 0,007 / 0.062 = 0,68$, что говорит о достаточной стабильности процесса. Ве-

личина критерия Фишера для описанного процесса $F = \left(0{,}017 / 0{,}007 \right)^2 = 5{,}897$ позволяет, с вероятностью близкой к 100 %, утверждать что процесс обработки «находится в состоянии статистической управляемости» [2], т. е., является стабильным.

Таким образом, гипотезу о возможности количественной оценки стабильности процессов механической обработки по характеристикам статистически определяемых закономерностей, например по соотношению стандартного отклонения выборки и стандартной ошибки модели, можно считать подтвержденной.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ГОСТ 27.002–89. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения. – М. : ИПК Издательство стандартов, 2002.

2. ГОСТ Р 50779.11–2000 (ИСО 3534.2-93) Статистические методы. Статистическое управление качеством. Термины и определения. – М. : Стандартинформ, 2008.

3. ГОСТ Р 50779.44–2001. Статистические методы. Показатели возможностей процессов. Основные методы расчета. – М. : ИПК Издательство стандартов, 2001.

4. Р 50-601-20–91 Рекомендации по оценке точности и стабильности технологических процессов. – М. : ВНИИС. – 1991.

5. *Горячев, В. В*. К вопросу оценки точности технологических процессов / В. В. Горячев, Н. С. Херсонский // Методы менеджмента качества. – 2010. – № 7. – С. 56–58.

6. *Химмельблау, Д.* Анализ процессов статистическими методами / Д. Химмельблау. – М. : Мир, 1973. – 960 с.

7. *Чигиринский, Ю. Л.* Методика статистического оценивания надежности процесса / Ю. Л. Чигиринский, Н. В. Чигиринская // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 8 / ВолгГТУ. – Волгоград, 2009. – (Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении» ; вып. 5). – С. 53–56.

8. *Чигиринская, Н. В*. Моделирование непериодических стохастических процессов : учеб. пособие / Н. В. Чигиринская, Ю. Л. Чигиринский, А. С. Горобцов ; ВолгГТУ. – Волгоград, 2020. – 107 с.

9. *Shewhart, W. A*. Statistical Methods from the Viewpoint of Quality Control. – Lancaster Press, Lancaster, PA, 1939. – 501 p. – URL : https://deming.pro/assets/statistical-method-from-the-viewpoint-of-quality-control-shewhart-walter.pdf.

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

УДК 681.5
DOI: 10.35211/1990-5297-2021-1-248-45-47

Н. В. Авдеев, С. И. Сакерин, А. С. Шатилов, Е. Г. Крылов

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА ОЧИСТКИ ВОДНЫХ ИСТОЧНИКОВ НА БАЗЕ ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНОЙ УСТАНОВКИ

Волгоградский государственный технический университет
E-mail: nikitaavdeev2@yandex.ru

Приведена разработанная математическая модель процесса очистки водных источников на базе электроразрядной установки. В ходе работы были сопоставлены экспериментальные данные и результаты моделирования. Расхождение между полученными данными составило не более 6 %.

Ключевые слова: электроэрозионная очистка, электроразрядные установки, компьютерное моделирование, водоочистные установки.

N. V. Avdeev, S. I. Sakerin, A. S. Shatilov, E. G. Krylov

DEVELOPMENT OF A MATHEMATICAL MODEL OF THE PROCESS OF PURIFICATION OF WATER SOURCES ON THE BASIS OF ELECTRIC DISCHARGE INSTALLATION

Volgograd State Technical University

The developed mathematical model of the water source purification process based on an electric discharge installation is presented. In the course of the work, experimental data and simulation results were compared. The discrepancy between the obtained data was no more than 6 %.

Keywords: electroerosive cleaning, electric discharge installations, computer modelling, water treatment plants.

Сегодня все более трудоемкой и актуальной задачей является очистка водных источников от загрязнений [1]. На данный момент использование электрической энергии в физико-химических методах очистки воды составляет основную концепцию новых методов. Одним из таких методов является метод очистки воды, базирующийся на электрической эрозии.

Целью данной работы является разработка математической модели процесса очистки водных источников на базе электроразрядной установки.

По итогам проведенного анализа, были выделены три основные стадии протекания моделируемого процесса:

1) распространение электрических разрядов между металлическими шариками в межэлектродном пространстве бака-реактора водоочистной установки;

2) протекание процесса электрической эрозии на поверхности металлических шариков и выброс продуктов эрозии;

3) протекание химических реакций окисления и сорбции вредных примесей, содержащихся в очищаемом водном растворе.

Для создания системы управления электроэрозионной водоочистной установкой необходима математическая модель процесса как объекта управления. Для достижения желаемого результата были сформулированы основные входные и выходные переменные, разработана информационная модель электроэрозионной водоочистной установки как объекта управления (рис. 1).

В качестве возмущающего воздействия выделена концентрация вредных примесей, содержащихся в исходном водном растворе ($C^{i}_{\text{вх.рас.}}$), в качестве управляющей переменной выбрана частота ($f_{\text{имп.}}$), напряжение ($U_{\text{имп.}}$), и длительность ($t_{\text{имп.}}$) электрических импульсов, в качестве контролируемой переменной выбрана концентрация примесей ($C^{i}_{\text{обр.рас.}}$) и образующихся продуктов электрической эрозии (C_{Fe}).

© Авдеев Н. В., Сакерин С. И., Шатилов А. С., Крылов Е. Г., 2021.

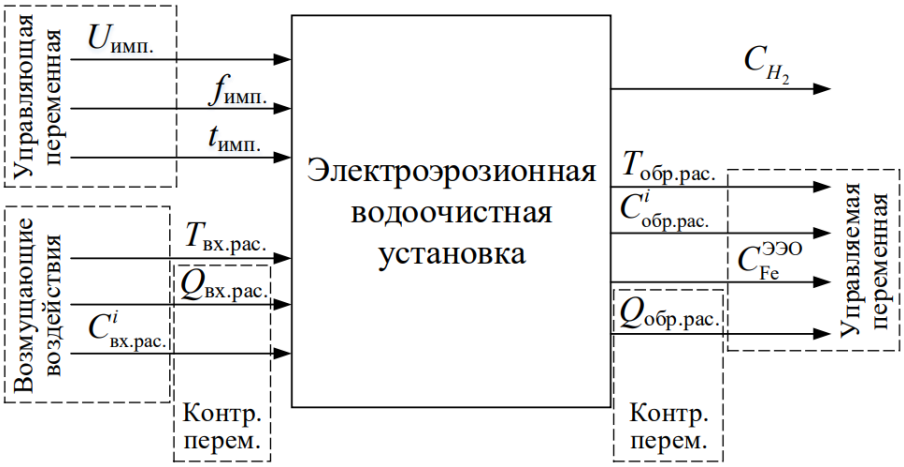


Рис. 1. Информационная модель электроэрозионной водоочистной установки как объекта управления

На рис. 1 приведены следующие обозначения:

$U_{имп.}$, $f_{имп.}$, $t_{имп.}$ – напряжение, частота и длительность электрических импульсов; $Q_{вх.рас.}$, $T_{вх.рас.}$ – расход и температура входного водного раствора; $C^i_{вх.рас.}$ – концентрация примесей во входном водном растворе; C_{H_2} – концентрация водорода в воздухе помещения, в котором работает установка; $C^i_{обр.рас.}$ и $C^{ЭЭО}_{Fe}$ – концентрация примесей и продуктов электрической эрозии в обработанном водном раствор; $Q_{обр.рас.}$, $T_{обр.рас.}$ – расход и температура обработанного водного раствора.

Ключевым требованием, которое предъявляется к математической модели электроэрозионного процесса очистки воды, является описание связей между переменными входа и выхода, с учетом динамики физико-химических процессов, происходящих в аппарате. На основании проведенного анализа процесса были выделены основные стадии протекания процесса и разработана информационная модель электроэрозионного процесса очистки воды как объекта моделирования (рис. 2).

Для разработки математической модели распространения электрических разрядов между металлическими шариками в межэлектродном пространстве был использован метод вероятностных клеточных автоматов.

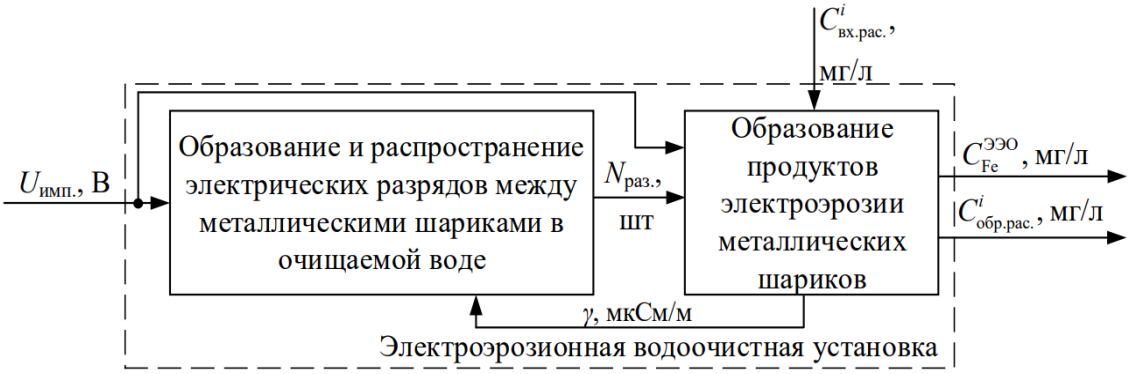


Рис. 2. Информационная модель электроэрозионной водоочистной установки как объекта моделирования: $N_{раз.}$ – количество разрядов, возникающих между металлическими шариками, загруженными в межэлектродное пространство установки; γ – электрическая проводимость водного раствора

Кинетика химических реакций окисления продуктов электроэрозии и осаждения примесей была описана системой дифференциальных уравнений (представлена ниже), в соответствии с положениями, приведенными в работе [2]:

$$\begin{cases} \dfrac{\mathrm{d}C^i_{\text{обр.рас.}}}{\mathrm{d}t} = \dfrac{Q_{\text{обр.рас.}}}{V_{\text{в.р.}}} \cdot \left(C^i_{вх.рас.} - C^i_{\text{обр.рас.}} \right), \\ \dfrac{\mathrm{d}C_{\text{Fe}}}{\mathrm{d}t} = \dfrac{m^{\text{ЭЭО}}_{\text{Fe}}}{\mathrm{d}t} - \dfrac{Q_{\text{обр.рас.}}}{V_{\text{в.р.}}} \cdot C_{\text{Fe}}, \\ \dfrac{\mathrm{d}\gamma}{\mathrm{d}t} = \dfrac{C^i_{\text{обр.рас.}}}{k_\gamma}, \\ \dfrac{\mathrm{d}m^{\text{ЭЭО}}_{\text{Fe}}}{\mathrm{d}t} = 2 \cdot N_{\text{раз}} \cdot V_{\text{лун}} \cdot \rho_{\text{шар}}, \\ V_{\text{лун}} = 0,5 \cdot \pi \cdot R^2_{\text{лун}} \cdot h_{\text{лун}}, \\ d_{\text{лун}} = \left(73,96 \cdot d^2_{\text{шар}} - 930,1 \cdot d_{\text{шар}} + 3602 \right) \cdot q^{0,2309}_{\text{кан}} + \left(27,16 \cdot d^2_{\text{шар}} + 218,1 \cdot d_{\text{шар}} - 278,4 \right), \\ h_{\text{лун}} = q_{\text{плав}} \cdot \left(c_{\text{шар}} \cdot \left(T_{\text{плав}} - T_{\text{шар}} \right) \cdot \rho_{\text{шар}} \right)^{-1}, \\ q_{\text{плав}} = 4,45 \cdot k_{\text{эф}} \cdot q_{\text{кан}} \cdot \left(\pi \cdot R^2_{\text{лун}} \right)^{-1}. \end{cases}$$

Процесс формирования эрозионных лунок на поверхностях металлических шариков и выделения продуктов электрической эрозии был описан с помощью основных физических законов.

Представленная математическая модель реализована на базе пакета прикладных программ MatLab [3]. В ходе работы были сопоставлены экспериментальные данные и результаты моделирования, расхождение между которыми не превысило 6–8 %. Полученные результаты являются приемлемыми для дальнейшего использования разработанной математической модели при оптимизации энергозатрат электроэрозионного процесса очистки воды.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Моделирование физических процессов в биореакторе / Д. Д. Ермишов, А. М. Макаров, Е. Г. Крылов, М. П. Кухтик // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 5 (200) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2017. – (Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении»). – С. 62–66.

2. *Nadezhdin I.S., Papasidero D., Goryunov A.G., Manenti F.* Optimisation of EDM process for water purification // Chemical Engineering Transactions. – 2016. – Vol. 52. – P. 325–330.

3. *Лазарев, Ю. Ф.* Моделирование процессов и систем в MATLAB / Ю. Ф. Лазарев. – Санкт-Петербург : Питер; Киев : Издательская группа BHV, 2005. – 512 с.

УДК 621.9.048.4
DOI: 10.35211/1990-5297-2021-1-248-47-50

М. Н. Буза, Н. О. Бутусов, А. С. Воронин, А. Г. Алехин

ОЦЕНКА И ВЫБОР МЕТОДА РЕАЛИЗАЦИИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ НАТЯЖЕНИЕМ ПРОВОЛОКИ В ВЫРЕЗНЫХ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННЫХ СТАНКАХ

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

Рассматриваются варианты исполнения механизма натяжения электрода в электроэрозионном станке с целью обеспечения быстрой смены нити электрода и необходимой степени натяжения.

Ключевые слова: электроэрозионный станок, электрод-проволока, натяжение.

M. N. Buza, N. O. Butusov, A. S. Voronin, A. G. Alekhin

EVALUATION AND SELECTION OF THE METHOD FOR CONTROL SYSTEM THE WIRE TENSION IN CUT-OUT ELECTRIC EROSION MACHINES

Volgograd State Technical University

Variants of the electrode tension mechanism in an electric erosion machine are considered in order to ensure a quick change of the electrode thread and the required degree of tension.

Keywords: electric erosion machine, electrode-wire, tension.

© Буза М. Н., Бутусов Н. О., Воронин А. С., Алехин А. Г., 2021.

Электроэрозионная обработка – процесс формообразования детали под действием электрических разрядов. Основными ее преимуществами являются: точность, производительность, способность изготовления деталей сложной формы [1, 2, 3].

В электроэрозионной резке инструментом является электрод-проволока диаметром 0,1–0,3 мм. Проволока натягивается в специальном механизме станка и, совершая перемещения в пространстве относительно обрабатываемой детали, осуществляет резание заготовки подобно лобзику, но с постоянным зазором от обрабатываемой поверхности [4].

Существует несколько исполнений механизма натяжения электрода-проволоки [5].

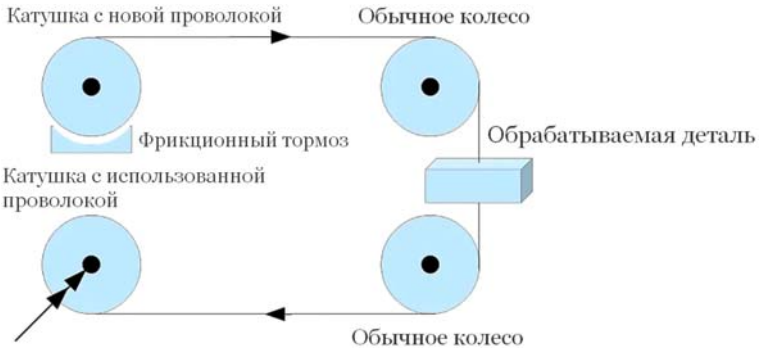


Рис. 1. Первый вариант механизма натяжения нити электрода

На рис. 1 изображен первый способ натяжения проволоки-электрода. Натяжение происходит путем перемотки нити с одной катушки на другую через систему блоков. При этом на первой катушке установлен фрикционный тормоз, которой препятствует смотке проволоки-электрода, тем самым, ее натягивает. Достоинством этой системы является простая конструкция, которая достаточно проста в исполнении. Недостатком является то, что натяжение проволоки проходит по всей длине электрода-проволоки, тем самым, происходит сильный износ системы и сильно снижается срок службы нити.

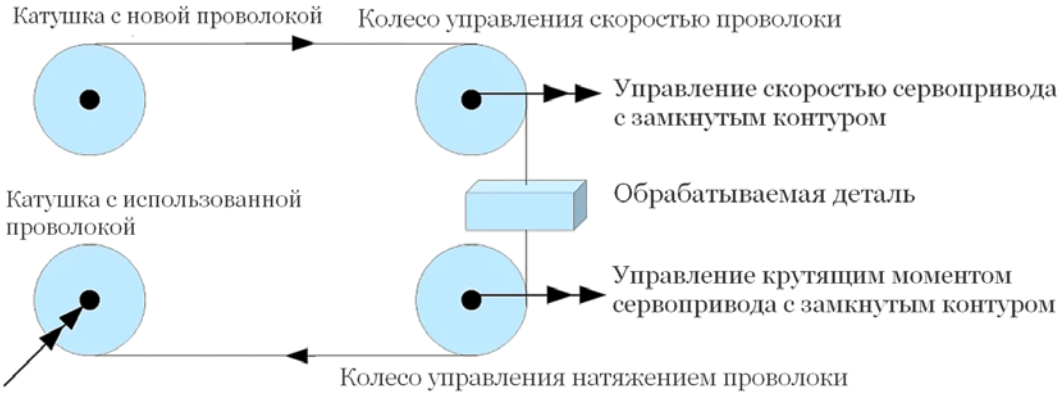


Рис. 2. Второй вариант механизма натяжения нити электрода

На рис. 2 изображен второй способ натяжения проволоки-электрода. Натяжение происходит путем замены двух центральных блоков, которые отделяют рабочую область нити электрода, на два серводвигателя, работающих синхронизировано друг с другом. Первый серводвигатель необходим для того, чтобы регулировать скорость размотки проволоки-электрода, а второй серводвигатель задает нужную степень натяжения [6, 7].

Достоинством этой системы является обеспечение натяжение электрода-проволоки только в рабочей области, что позволяет продлить срок службы проволоки и уменьшить напряжение в системе. Недостатками второго вариант механизма является сложная реализация системы и ее настройка, требующая специальных навыков. Также происходит потеря контроля над системой при обрезке проволоки, либо при ее обрыве, так как система сервоприводов явля-

ется замкнутой. Для того чтобы устранить последний недостаток существует третий вариант исполнения механизма натяжения (рис. 3).

Третий вариант механизма натяжения является усовершенствованием второго [8]. В этом механизме вместо замкнутого контура используется разомкнутый контур. Для того чтобы обеспечить правильный режим работы механизма натяжения необходимо внедрения фрикционного тормоза, который использовался в первом варианте механизма натяжения. Он нужен для обеспечения остановки при обрыве или срезке электрода-проволоки, что предотвращает бесконтрольную размотку катушки с нитью. Недостатком этой системы является сложная реализация системы управления электродвигателями, а также сложность достижения равновесия между фрикционным тормозом и электродвигателем, регулирующим скорость размотки электрода-проволоки.

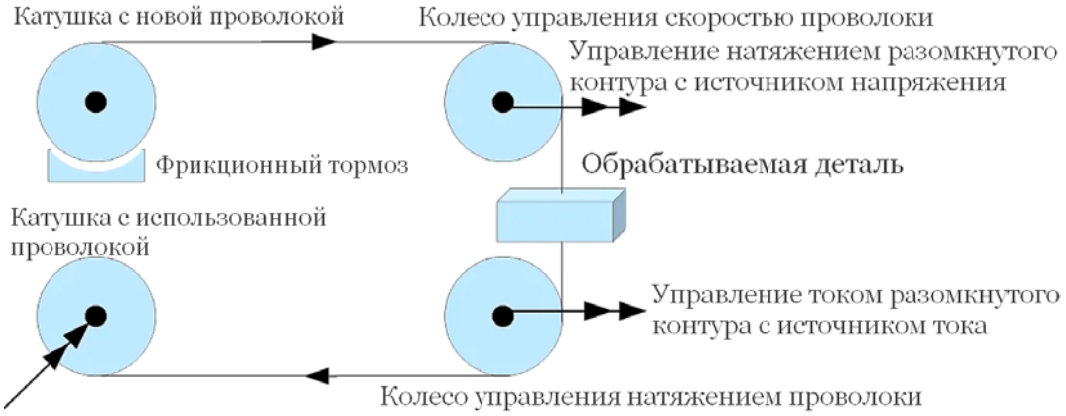


Рис. 3. Третий вариант механизма натяжения нити электрода

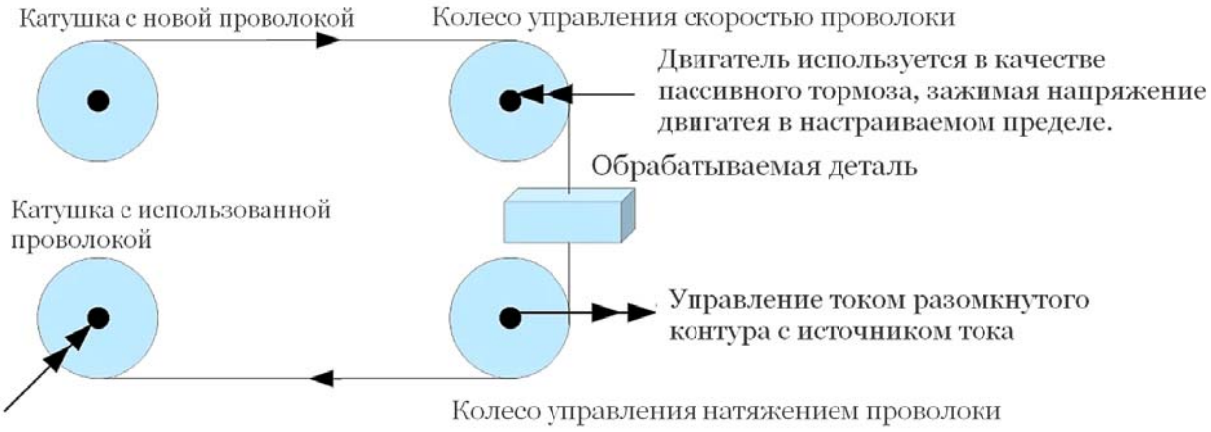


Рис. 4. Четвертый вариант механизма натяжения нити электрода

В четвертом варианте (рис. 4) функцию размотки электрода-проволоки несет нижний электродвигатель, а верхний выполняет функцию пассивного тормоза, вращаясь в противоположную от верхнего электродвигателя сторону. Это конструкция обладает значительным преимуществом над остальными вариантами – это простота в совокупности с эффективностью.

Изучив альтернативные варианты исполнения механизма натяжения проволоки-электрода, принято решение использовать 4 вариант исполнения, который обеспечит необходимую степень натяжения нити электрода и будет достаточно прост в реализации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Пахомов, В. В.* Разработка системы управления генератором высокочастотных колебаний электроэрозионного станка / В. В. Пахомов, А. Г. Алехин // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 9 (232) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2019. – (Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении»). – С. 60–62.

2. Электроэрозионная обработка металлов / Е. М. Левинсон. – Лениздат, 1961. – 184 с..

3. Технологии электроэрозионной обработки / Н. К. Фотеев. – Машиностроение, 1980. – 184 с

4. Влияние длительности импульса на электрическую эрозию металлов / Б. И. Золотых // Электричество. – 1950. – № 8.

5. Электроэрозионная обработка деталей / В. Э. Думпе. – Киев : Техника, 1975. – 320 с

6. *Wentai S, Zhidong L, Mingbong Q, Zongjun T* (2015) Wire tension in high-speed wire electrical discharge machining. Int J Adv Manuf Technol

7. P.C. Pandey and H.S. Shan, "Modern Machining Processes", Tata McGraw-Hill Publishing Company, 1980, page 79-80.

8. Rajeev Kumar and Shankar Singh “Current Research Trends in Wire Electrical Discharge Machining: An Overview” International Journal on Emerging Technologies 3(2012): page 33-40.

УДК 67.02
DOI: 10.35211/1990-5297-2021-1-248-50-52

А. В. Ваганов, А. М. Макаров, А. В. Малолетов, Е. А. Дьяченко

ИССЛЕДОВАНИЕ УДЕЛЬНОГО ВРЕМЕНИ 3D ПЕЧАТИ

Волгоградский государственный технический университет
E-mail: usersnowman@mail.ru

Проводится исследование удельного времени 3D печати по технологии FFFодного грамма материала. Описывается методика проведения исследования, используемое программное обеспечение и его настройки при проведении исследования, проводится анализ полученных данных и итоговых результатов.

Ключевые слова: аддитивные технологии, 3D печать, 3D принтер, производительность.

A. V. Vaganov, A. M. Makarov, A. V. Maloletov, E. A. Dyachenko

RESEARCH SPECIFIC TIME OF 3D PRINTING

Volgograd State Technical University

A study of the specific time of 3D printing using the FFF technology of one gram of material is being carried out. It describes the methodology of the study, using software, and configure it in a study, an analysis of the data and the final results.

Keywords: additive technologies, 3D printing, 3D printer, productivity.

Введение

На сегодняшний день аддитивные технологии (3D печать) пользуются большой популярностью в науке и промышленности. Наибольшее распространение получили устройства, работающие по технологии FFF (FusedFilament-Fabrication) – производство методом наплавления нитей. Актуальность FFF технологии обусловлена возможностью создавать изделия сложной формы, доступностью устройств печати и материалов, при этом производство может быть штучным. Данная технология имеет и ряд существенных недостатков, одним из которых является низкая производительность (печать одной детали может занимать несколько дней) [1–6].

Целью данного исследования является определение удельного времени 3D печати – времени, за которое 3D принтер способен напечатать один грамм материала.

Материалы и методы исследования

Для проведения исследования используется программное обеспечение UltimakerCuraверсии 3.6.0, которое при подготовке 3D модели к печати позволяет в автоматическом режиме рассчитывать время печати и массу конкретной 3D модели. Настройки программного обеспечения, используемые в ходе исследования и способные влиять на результат, приведены в табл. 1.

Таблица 1

Настройки программного обеспечения UltimakerCura

Диаметр сопла	0,4 мм
Толщина слоя	0,2 мм
Заполнение модели	100 %
Скорость печати	60 мм/с
Заполнение поддержек	15 %

Сущность исследования заключается в следующем: в программное обеспечение UltimakerCura загружается 3D модель, программа рассчитывает время печати и массу детали, полученные данные записываются в таблицу, фрагмент которой представлен в табл. 2. С помощью

© Ваганов А. В., Макаров А. М., Малолетов А. В., Дьяченко Е. А., 2021.

полученных данных рассчитывается удельное время печати одного грамма материала для данной 3D модели по формуле (1):

$$t_{уд} = \frac{t}{m}, \quad (1)$$

где $t_{уд}$ – удельное время печати (мин/г); t – время печати модели (мин); m – масса модели (г).

При этом используемые единицы измерения не приводятся к системе СИ, так как использование единиц измерения СИ не рационально в данном исследовании.

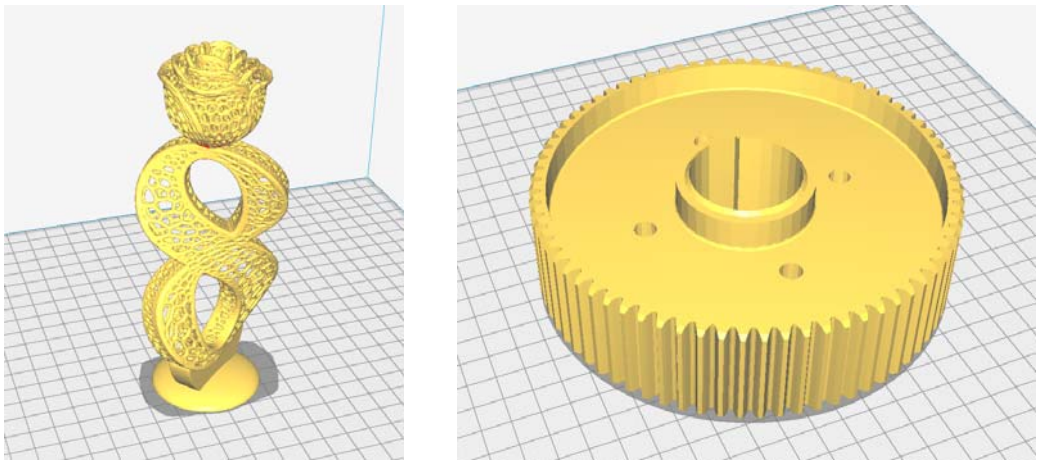
Таблица 2

Экспериментальные данные десяти моделей

№	Название модели	Масса m, г	Время печати t, мин	Удельное время печати $t_{уд}$, мин/г
1	Статуэтка 8 марта	86	479	5,57
2	Обдув экструдера	4	24	6
3	Винт актуатора	415	2314	5,58
4	Зубчатое колесо актуатора	418	2290	5,49
5	Брелок 3Д	2	12	6
6	Бутылка Grass	802	4512	5,63
7	Бюст Маяковского	27	155	5,74
8	Втулка пневмоцилиндра	35	199	5,69
9	Конус	85	490	5,77
10	Кабина трактора	1800	9328	5,18

Результаты и их обсуждение

В ходе работы были исследованы пятьдесят 3D моделей, имеющих различную геометрию, примеры моделей представлены на рисунке.



Примеры исследуемых 3D моделей

По полученным данным рассчитывается среднее значение удельного времени печати по формуле (2):

$$t_{уд.ср} = \frac{\Sigma t_{уд}}{50} = 5{,}62\ мин/г, \quad (2)$$

где $t_{уд.ср}$ – среднее значение удельного времени печати.

При этом максимальное и минимальное удельное время печати составило соответственно 6,29 мин/г и 4,92 мин/г, таким образом отклонение максимального удельного времени печати 8,4 % и минимального 12,5 %.

В ходе исследования было получено экспериментальное значение удельного времени печати, равное 5,62 мин/г. Полученный результат подтверждает существование проблемы низкой производительности 3Dпринтеров, работающих по FFF технологии, в сравнении с классическим литьем пластиковых изделий и может быть полезен для расчетов, связанных с 3D печатью.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Торубаров, И. С.* Анализ подходов к повышению производительности 3D-печати / И. С. Торубаров [и др.] // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 9 (232) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2019. – (Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении»). – С. 69–72.

2. *Лисин, Р. А.* Внедрение 3D принтеров и 3D печати в образовательный процесс / Р. А. Лисин // I Всероссийский культурологический форум «Молодежь и культура: образование, техника, инновации» : матер. VI Всерос. студ. науч.-практ. конф. / Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева-КАИ. – Казань, 2015. – С. 97–99.

3. *Тимуршин, Ю. Ф.* Технологии быстрого прототипирования 3D-печати / Ю. Ф. Тимуршин // Наука сегодня : задачи и пути их решения : матер. междунар. науч.-практ. конф. – Вологда, 2016. – С. 38–40.

4. *Кокцинская, Е. М.* Технология 3D-печати: обзор последних новостей / Е. М. Кокцинская // Видеонаука. – 2016. – № 2 (2). – С. 6.

5. *Токарев, Б. Е.* Анализ технологий рынка 3D печати: два года спустя [Электронный ресурс] / Б. Е. Токарев, Р. Б. Токарев // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ», 2016. – Т. 8. – № 1. – Загл. с экрана. – Режим доступа: http://naukovedenie.ru/PDF/28EVN116.pdf (дата обращения: 10.11.20).

6. *Шмелева, А. А.* Анализ способов автоматического снятия и извлечения напечатанных изделий из камеры 3D-принтера / А. А. Шмелева [и др.] // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 9 (232) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2019. – (Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении»). – С. 76–78.

УДК 629.038
DOI: 10.35211/1990-5297-2021-1-248-52-54

И. В. Волков, Я. В. Калинин, Н. А. Сурганов, С. Н. Шабанов

ОБЗОР СТЫКОВОЧНЫХ УСТРОЙСТВ КОЛЕСНО-ШАГАЮЩЕЙ ПЛАТФОРМЫ ДЛЯ АГРОРОБОТА

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

Данная статья посвящена обзору стыковочных устройств колесно-шагающей платформы для агроробота. В ней описаны плюсы разделения колесно-шагающей платформы на две разные платформы. Представлен обзор конструкций стыковочных устройств. Приведена таблица достоинств и недостатков каждого из механизмов стыковочных устройств.

Ключевые слова: колесно-шагающая платформа, стыковочное устройство, автомобильный дверной замок, разделяемая платформа.

I. V. Volkov, Ya. V. Kalinin, N. A. Surganov, S. N. Shabanov

OVERVIEW OF DOCKING DEVICES FOR A WHEELED WALKING PLATFORM FOR AGRO-ROBOT

Volgograd State Technical University

This article is devoted to an overview of docking mechanisms of the wheeled-walking platform for an agro-robot. It describes the advantages of dividing the wheeled-walking platform into two different platforms. An overview of the docking mechanism designs is presented. A table of advantages and disadvantages of each of the docking mechanisms is given.

Keywords: wheeled-walking platform, docking mechanism, car door lock, dividable platform.

Традиционно в агропромышленном комплексе для работ на местности используют колесные устройства. Колесной базы зачастую не хватает для совершения качественной работы. Работы затрудняются непреодолимыми ландшафтами сельскохозяйственных угодий. Чтобы нивелировать данную проблему, прибегают к шагающей базе. Комбинирование двух баз дает нам решение данной проблемы. Поэтому фермеры все чаще стали прибегать к колесно-шагающим платформам.

Использование колес и опор (ног) в гибридной конструкции платформы, позволяет учесть преимущества и компенсировать недостатки двух способов перемещения (колесный и шагающий). Недостатком данной колесно-шагающей платформы является утяжеление конструкции, что ведет за собой увеличение энергопотребления.

Приведем примеры колесно-шагающих машин: аппарат, созданный ВНИИТМ [1], робот ATHLETE [2].

© Волков И. В., Калинин Я. В., Сурганов Н. А., Шабанов С. Н., 2021.

Для применения в сельском хозяйстве было принято решение разделить устройство на две независимые платформы, колесную и шагающую, которые при необходимости осуществляли автоматическую стыковку. Данный вариант организации агроробота позволяет получить следующие преимущества:

1) в разделенном состоянии, находясь на относительно небольшом удалении друг от друга, платформы могут выполнять различные работы;

2) при выполнении конкретной задачи одной платформой, на нее снижается нагрузка за счет временного отсутствия второй платформы, что обеспечивает высокую энергоэффективность и динамические характеристики;

3) совместное использование платформ обеспечивает высокую проходимость и функцию выравнивания горизонта.

Для осуществления совместной работы производится автоматическая стыковка двух платформ. Для данной конструкции стыковочный механизм должен иметь высокие прочностные характеристики, функцию автоматического центрирования и отсутствие энергопотребления в фазе удержания ответной части. Поэтому, в качестве прототипов разрабатываемого механизма были выбраны механизм дверного замка автомобиля и седельно-сцепное устройство.

Конструкция дверного замка автомобиля.

Запорный механизм предназначен для закрытия двери и в своем устройстве имеет поворотную защелку и стопорную собачку. При закрытии двери автомобиля защелка заходит на скобу держателя замка, а стопорная собачка в свою очередь фиксирует. Конструкция собачки имеет два фиксирующих положения которые обеспечивают полное и неполное закрытие двери. При не полном закрытии двери дверь все равно блокируется для безопасности.

Рычажный механизм обеспечивает открытие запорного механизма. При воздействии на наружную или внутреннюю ручки двери авто усилие передается на рычажный механизм и через тяги воздействует на стопор и освобождает поворотную защелку, которая освобождается от зацепления. Механизм блокировки блокирует рычажный механизм, в целях закрытия и сохранности автомобиля. При воздействии на дверную ручку дверь не откроется. Имеет в своем устройстве два параллельно связанных привода: механический и электро-механический.

Механический привод соединяет цилиндр замка с механизмом блокировки для воздействия ключом. Электромеханический – соединяет электродвигатель встроенный в замке и червячный редуктор, который также блокирует рычажный механизм [3].

На рис. 1 представлена конструкция дверного замка автомобиля, состоящая из: *1* – поворотной защелки, *2* – держателя замка и *3* – стопорной собачки.

Конструкция седельно-сцепного устройства.

Сцепное оборудование или попросту седло, представляет собой грузонесущую плиту с угловой прорезью для вхождения шкворня от полуприцепа. Его присоединение происходит в автоматическом режиме, под плитой расположен механизм фиксации шкворня. Для предотвращения самопроизвольного отцепления устанавливают два независимых замка, которые к расцепке подготавливают вручную. Вся эта металлоконструкция обеспечивает две или три степени свободы [4].

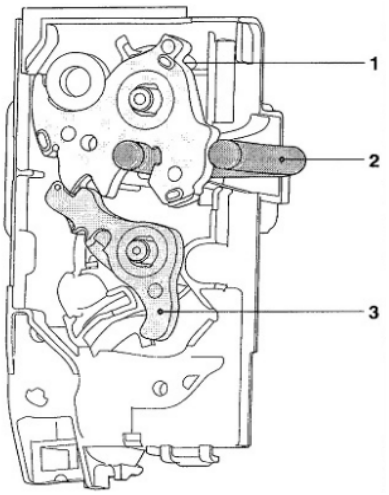


Рис. 1. Конструкция дверного замка автомобиля

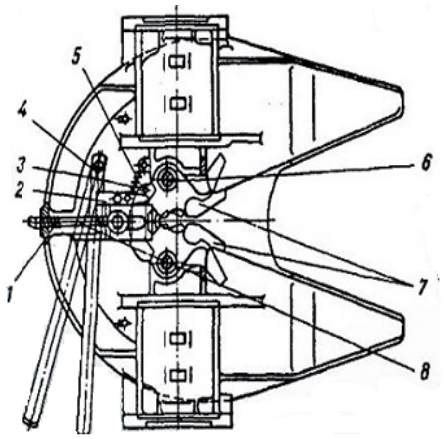


Рис. 2. Конструкция седельно-сцепного устройства

На рис. 2 представлена конструкция седельно-сцепного устройства, состоящая из: *1, 3* – пружины, *2* – защелки, *4* – рукоятки замка, *5* – штифта, *6* – оси захвата, *7* – захвата и *8* – опорного кулака.

Достоинства и недостатки механизмов стыковки

Механизм	Достоинства	Недостатки
Дверной замок автомобиля	Компактность	Необходимость механического воздействия для расцепки
	Самозащелкивание	Отсутствие самоцентрирования
Седельно-сцепное устройство	Самозащелкивание	Большие габариты
	Самоцентрирование	Необходимость механического воздействия для расцепки

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Охоцимский, Д. Е.* Алгоритмы управления шагающим аппаратом, способным преодолевать препятствия / Д. Е. Охоцимский, А. К. Платонов // Известия АН СССР, Техническая кибернетика. – 1973. – № 5. – С. 3–10.

2. Editor: NASA ContentAdministrator. The ATHLETE Rover [Электронный ресурс] // NASA : официальный сайт – 2020 – Режим доступа : https://www.nasa.gov/multimedia/imagegallery/image_feature_748.html (дата обращения 26.10.2020).

3.Седельно-сцепное устройство [Электронный ресурс] // novustrailer: официальный сайт – 2020 – Режим доступа : https://novustrailer.ru/company/articles/sedelno_stsepnoe_ustroystvo_konstruktsiya_i_osnovnye_parametry_printsip_raboty/ (дата обращения 30.10.2020).

4. Устройство автомобильного дверного замка [Электронный ресурс] // looksdoor: официальный сайт – 2020 – Режим доступа : http://locksdoor.ru/ustrojstvo-avtomobilnogo-dvernogo-zamka/ (дата обращения 30.10.2020).

УДК 621.73.016+62-758.2
DOI: 10.35211/1990-5297-2021-1-248-54-57

Э. Ц. Галсанова, Я. В. Калинин

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ НАГРЕВЕ ТОНКИХ ЛИСТОВЫХ ЗАГОТОВОК

Волгоградский государственный технический университет
E-mail: erjena_g@mail.ru

Представлены результаты теоретических исследований в области температурных напряжений, возникающих при нагреве пластины заготовки. Выведены теоретические уравнения температурных напряжений по площади заготовки.

Ключевые слова: температурные напряжения, горячая штамповка, листовая штамповка, нагревательная установка, нагревание.

E. Ts. Galsanova, Ya. V. Kalinin

DETERMINATION OF TEMPERATURE STRESSES DURING HEATING OF THIN SHEET BLANKS

Volgograd State Technical University

The results of theoretical studies in the field of temperature stresses arising during heating of the billet plate are presented. The theoretical equations of temperature stresses over the workpiece area are derived.

Keywords: temperature stresses, hot stamping, sheet stamping, heating unit, heating.

В работе [1] были сделаны выводы о необходимости равномерного распределения напряжений по площади заготовки при нагреве для горячей листовой штамповки для уменьшения пружинения готового изделия. Одной из причин появления напряжений без приложения внешних нагрузок в сплошном теле является его неравномерное нагревание. Такое расширение в непрерывном (сплошном) теле, вообще говоря, не может происходить свободно, поэто-

© Галсанова Э. Ц., Калинин Я. В., 2021.

му при нагревании возникают напряжения [2]. Общие выражения для определения температурных напряжений были выведены Жан-Мари Констаном Дюамелем, и независимо от него Францем Нейманом (FranzNeuman), поэтому их часто называют уравнениями Дюамеля-Неймана.

В простейших случаях расчет термических напряжений с учетом геометрии детали и условий закрепления представляет собой достаточно сложную задачу теории упругости [3], в результате решения которой возникают достаточно сложные дифференциальные уравнения в частных производных, аналитическое разрешение которых требует привлечения аппарата математической физики [4], а численное решение требует привлечения высокоуровневых вычислительных методов [5].

Целью работы является вывод теоретических уравнений термическихнапряженийпригодных для создания инженерной методики исследования влияния температурных перепадов на распределение напряжений по площади заготовкив пластине по температурному полю в условиях нагрева при горячей листовой штамповке.

Вывод теоретических уравнений температурных напряжений

Для большинства традиционных конструкционных материалов, применяемых в машиностроении[6], температурнаядеформацияε_T пропорциональна изменению температурыΔT,

$$\varepsilon_T = \alpha \cdot \Delta T, \qquad (1)$$

где α – коэффициент температурного расширения.

Рассмотрим кратко вывод теоретических уравнений теории упругости с учетом температурных напряжений для односвязного, однородного тела с допущением, что градиент температур внутри тела невелик и все упругие константы материала можно считать зависящими от температуры нагрева, но постоянными по объему тела в любой момент времени нагрева. Будем считать, что процесс нагрева устанавливается быстро и идет достаточно равномерно в пределах тела и в любой момент времени ситуация с градиентами температур одинакова. Это допущение позволит рассмотреть только лишь окончательное состояние нагреваемого тела, после которого и будет производиться пластическое деформирование – штамповка. В дальнейшем будут употребляться стандартные обозначения классической теории упругости.

Представим себе малый элемент, вырезанный из тела, подвергающегося изменению температуры. Если температура тела меняется непрерывно по всему объему тела, то температуру этого малого элемента можно считать равномерной. Если элемент может свободно расширяться и если обозначить через T – изменение его температуры в каждой конкретной точке тела, отсчитываемое от известной равномерной начальной температуры тела и через α, который будем считать постоянным при решении рассматриваемых задач, то составляющие деформации от изменения температуры будут равны:

$$\varepsilon_x = \varepsilon_y = \varepsilon_z = \alpha T; \gamma_{xy} = \gamma_{xz} = \gamma_{yz} = 0. \qquad (2)$$

Предположим, что температура T меняется по объему тела таким образом, что составляющие температурной деформации (2) удовлетворяют дифференциальным зависимостям, которые называют уравнениями совместности.

Уравнения могут быть преобразованы при помощи уравнений равновесия:

$$\begin{cases} \dfrac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \dfrac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \dfrac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} + X = 0; \\ \dfrac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \dfrac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \dfrac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} + Y = 0; \\ \dfrac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \dfrac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \dfrac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + Z = 0; \end{cases} \qquad (3)$$

Если объемные силы отсутствуют либо постоянны по величине, то преобразованные по приведенной выше схеме уравнения получают следующий вид:

$$\begin{cases} (1+\mu)\nabla^2 \sigma_x + \dfrac{\partial^2 \Sigma}{\partial x^2} = 0; \\ (1+\mu)\nabla^2 \sigma_y + \dfrac{\partial^2 \Sigma}{\partial y^2} = 0; \\ (1+\mu)\nabla^2 \sigma_z + \dfrac{\partial^2 \Sigma}{\partial z^2} = 0; \\ (1+\mu)\nabla^2 \tau_{yz} + \dfrac{\partial^2 \Sigma}{\partial y \partial z} = 0; \\ (1+\mu)\nabla^2 \tau_{xz} + \dfrac{\partial^2 \Sigma}{\partial x \partial z} = 0; \\ (1+\mu)\nabla^2 \tau_{xy} + \dfrac{\partial^2 \Sigma}{\partial x \partial y} = 0. \end{cases} \qquad (4)$$

Таким образом, уравнения (3), (4) и условия на поверхности

$$\begin{cases} \overline{X} = l\sigma_x + m\tau_{xy} + n\tau_{xz}; \\ \overline{Y} = m\sigma_y + n\tau_{yz} + l\tau_{xy}; \\ \overline{Z} = n\sigma_z + l\tau_{xz} + m\tau_{yz}; \end{cases} \quad (5)$$

образуют замкнутую систему уравнений, которая вообще говоря достаточна для определения всех составляющих напряжений с необходимой точностью, при этом выполняются все условия для существования и единственности решений.

Можно легко убедиться в том, что эти условия могут быть удовлетворены, если только все вторые производные температуры T по x, y и z обращаются в нуль, то есть если температура T постоянна или является линейной функцией координат. Тогда требования относительно существования непрерывных функций u, v, w, определяющих деформацию тела, будут удовлетворены, и температурных напряжений не будет.

Рассмотрим теперь общий случай распределения температуры, когда деформации от температуры (2) не удовлетворяют условиям совместности, и температурные напряжения возникают.

Для определения этих напряжений воспользуемся уравнениями равновесия в зависимости от перемещений u, v и w:

$$\begin{cases} (\lambda + G)\dfrac{\partial \Delta}{\partial x} + G\nabla^2 u + X = 0; \\ (\lambda + G)\dfrac{\partial \Delta}{\partial y} + G\nabla^2 v + Y = 0; \\ (\lambda + G)\dfrac{\partial \Delta}{\partial z} + G\nabla^2 w + Z = 0, \end{cases} \quad (6)$$

Замечаем, что деформации ε_x, ε_y и ε_z зависят не только от напряжений, но и от изменения температуры:

$$\begin{cases} \varepsilon_x = \dfrac{1}{E}\left[\sigma_x - \mu\left(\sigma_y + \sigma_z\right)\right] + \alpha T; \\ \varepsilon_y = \dfrac{1}{E}\left[\sigma_y - \mu\left(\sigma_x + \sigma_z\right)\right] + \alpha T; \\ \varepsilon_z = \dfrac{1}{E}\left[\sigma_z - \mu\left(\sigma_x + \sigma_y\right)\right] + \alpha T. \end{cases} \quad (7)$$

Полное напряжение от неравномерного нагревания получается наложением гидростатического давления $\dfrac{\alpha E T}{1-2\mu}$ на напряжения от объемных и поверхностных сил.

Поэтому окончательные выражения для условий равновесия:

$$\begin{cases} \dfrac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \dfrac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \dfrac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} - \dfrac{\alpha E}{1-2\mu}\dfrac{\partial T}{\partial x} = 0; \\ \dfrac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \dfrac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \dfrac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} - \dfrac{\alpha E}{1-2\mu}\dfrac{\partial T}{\partial y} = 0; \\ \dfrac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \dfrac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \dfrac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} - \dfrac{\alpha E}{1-2\mu}\dfrac{\partial T}{\partial z} = 0, \end{cases} \quad (8)$$

и условий на поверхности:

$$\begin{cases} l\dfrac{\alpha E T}{1-2\mu} = l\sigma_x + m\tau_{xy} + n\tau_{xz}; \\ m\dfrac{\alpha E T}{1-2\mu} = m\sigma_y + n\tau_{yz} + l\tau_{xy}; \\ n\dfrac{\alpha E T}{1-2\mu} = n\sigma_z + l\tau_{xz} + m\tau_{yz}; \end{cases} \quad (9)$$

совместно с условиями совместности и выражением для гидростатического давления $\dfrac{\alpha E T}{1-2\mu}$ даст нам выражения, возникающие в теле под действием изменения температуры.

Выводы

Решение полученных уравнений будет точным, если удовлетворяются уравнения совместности деформаций. При постоянных коэффициентах расширения α, если температура является линейной функцией координат, температурные деформации не возникают. Это связано с тем, что в выбранной декартовой системе координат уравнения совместности деформаций содержат вторые производные по координатам и в случае линейной зависимости температуры от координат обнуляются.

В случае анизотропных тел, даже при постоянной или линейно зависящей от координат температуре, либо при закреплении тела могут возникать температурные напряжения.

Основной вопрос, который можно разрешить в процессе исследования при помощи полученных уравнений – наличие и величина температурных напряжений в заготовке и их влияние на напряженно-деформированное состояние материала в каждой точке при пластическом деформировании.

Если при моделировании возможно будет доказать, что в результате нагрева определенным способом возникают небольшие температурные напряжения. То в таком случае можно будет отказаться при рассмотрении напряженно-деформированного состояния материала

в каждой точке при пластическом деформировании от учета температурных напряжений, что существенно упростит расчетные формулы для инженерной методики определения критических напряжений при штамповке и упростит план экспериментов по проверке соотношения теоретических расчетных значений и опытных данных для всех возможных технологических ситуаций.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Обоснование наиболее рациональных технологических факторов, влияющих на процесс формообразования при горячей листовой штамповке оковок из титанового сплава / Ц. А. Батуев, Э. Ц. Галсанова, А. Д. Грешилов // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 8(243) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2020. – (Серия: «Прогрессивные технологии в машиностроении»). – С. 19–22.

2. *Тимошенко, С. П.* Теория упругости / С. П. Тимошенко. – Л. : ОНТИ ГТТИ, 1934. – 452 с.

3. *Варданян, С. П.* Сопротивление материалов с основами теории упругости и пластичности / С. П. Варданян [и др.]. – М. : Издательство АСВ, 1995. – 568 с.

4. *Алиев, Р. Г.* Уравнения в частных производных : учеб. / Р. Г. Алиев. – М. : Издательство «Экзамен». – Изд. 2-е, доп. – 2005. – 320 с.

5. *Вержбицкий, В. М.* Основы численных методов / В. М. Вержбицкий. – М. : Высшая школа. – Изд. 2-е, перераб. – 2005. – 840 с.

6. *James M.* Gere, Barry J. Goodno. – Mechanics of Materials, 2009. – 1130 p.

УДК 67.02
DOI: 10.35211/1990-5297-2021-1-248-57-60

Е. А. Дьяченко, М. Ю. Козенко, А. М. Макаров, А. В. Ваганов

АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ КИНЕМАТИК 3D ПРИНТЕРОВ ТЕХНОЛОГИИ FFF/FDM

Волгоградский государственный технический университет
E-mail: zhenya.dyachenko.1999@gmail.com

Проводится сравнение кинематик, используемых в аддитивных технологиях, с целью определения их преимуществ и недостатков. Самая перспективная кинематика будет использована для создания на ее основе лабораторного стенда.

Ключевые слова: 3D печать, кинематика, Delta, SCARA, Cartesian, Polar.

E. A. Dyachenko, M. Yu. Kozenko, A. M. Makarov, A. V. Vaganov

ANALYSIS OF EXISTING KINEMATICS OF FFF / FDM 3D PRINTERS

Volgograd State Technical University

A comparison of the kinematics used in additive technologies is carried out in order to determine their advantages and disadvantages. The most promising kinematics will be used to create a laboratory stand based on it.

Keywords: 3D printing, Kinematics, Delta, SCARA, Cartesian, Polar.

Бурное развитие аддитивных технологий, в том числе изготавливающих изделия методом наплавления, приводит к тому, что на рынке появляется огромное количество схожих по принципу действия устройств. Однако далеко не все разработчики готовы экспериментировать с принципиально новыми конструкциями, и в своих работах они выбирают проверенные решения. В данной статье проводится обзор существующих кинематических решений для 3D принтеров и оценивается целесообразность их применения в 3D печати.

Ортогональная кинематика

3D принтеры FFF/FDM картезианской кинематики являются самыми распространенными из всех. Во многом это обусловлено их простотой. Кинематика работает в декартовой системе координат с перемещением рабочих органов (экструдера и платформы) вдоль осей X,Y,Z. Перемещаться могут как платформа для печати, так и экструдер. Наиболее распространен вариант с вертикальным перемещением для платформы и горизонтальным для экструдера [1].

Преимущества:

• Картезианская кинематика самая простая в изготовлении, эксплуатации и ремонте.

• Программное обеспечение не требует много вычислительных ресурсов, каждый привод напрямую привязан к одной из осей, что сводит к минимуму необходимые вычисления.

© Дьяченко Е. А., Козенко М. Ю., Макаров А. М., Ваганов А. В., 2021.

• Надежность. Высокая повторяемость и стабильность печати.

• Высокая точность печати при использовании низких скоростей перемещения до 50 мм/с.

Недостатки:

• Низкая скорость. Требования к большой жесткости деталей линейного перемещения приводят к увеличению массы узлов, а, следовательно, к высокой инерционности. Несмотря на то, что максимальная скорость, которую можно достичь благодаря этой кинематике составляет 200–250 мм/с, обеспечение удовлетворительного качества поверхности на такой скорости достаточно затруднительно. Именно поэтому оптимальной скоростью печати в большинстве случаев является 60–70 мм/с.

3D принтеры Delta кинематики

Данные 3D принтеры были созданы на основе Delta-роботов зарекомендовавших себя в роли высокоскоростных сортировщиков на конвейерных линия.

Основным отличием от картезианской кинематики является плоскопараллельное движение экструдера при неподвижном столе. Каретка экструдера попарно соединена шестью рычагами с тремя осями, перемещающимися по параллельным направляющими. Рычаги имеют на концах шарниры, выполненные в виде шарового подшипника скольжения, либо магнитного крепления. Каретки приводятся в движение зубчатыми ремнями от трех электродвигателей в направлении вертикальной оси принтера. Направляющие, являющиеся также зачастую несущими элементами конструкции, расположены в виде равностороннего треугольника [2].

К сожалению, как и любая другая кинематика она имеет свои ограничения. В Delta используется сложный расчет движения. Для перемещения каретки экструдера в горизонтальной плоскости необходимо опускать одну из осей, и немного поднимать две других. Именно из-за этого возникают все недостатки данной кинематики.

Преимуществами данной кинематике являются:

• Компактность. Принтеры занимают мало места и имеют большую высоту зоны печати.

• Скорость. Delta 3D принтеры занимают нишу высокоскоростных устройств. Скорость печати доходит до 300–400 мм/с.

Недостатки:

• Калибровка. Эти 3D принтеры сложно калибровать, так как на поверхности печати образуются вогнутые и выпуклые поверхности и методика точной настройки до сих пор не выработана.

• Точность. Высокая скорость приводит к падению точности изготовления изделий. Погрешность, возникающая из-за большого количества малых перемещений, имеет накопительный характер.

• Требования к вычислителю. Delta имеет минимальный порог требуемой вычислительной мощности, 8 битные системы слабо справляются с обработкой, в следствии чего появляются дефекты печати. По этой причине на принтерах стоят 32 битные платы, имеющие большую скорость обработки информации. Отдельного внимания заслуживают требования к точности сочленений в конструкции из-за большого влияния люфтов на качество печати.

• Экструдер. Вес используемого экструдера ограничен. Это связано с особенностями крепления каретки. Увеличение веса приводит к ухудшению качества печати и уменьшению скорости [3].

3D принтер на полярной системе координат Polar

Главная особенность этой кинематики – использование полярных координат. Экструдер перемещается в горизонтальной плоскости не по осям X,Y, а по окружности платформы. Положение экструдера задается за счет радиуса и угла поворота. Платформа имеет форму круга, вращается вокруг своей оси и перемещается вдоль одной из осей.

Преимущества:

• Высокая энергоэффективность.

• Удобство при печати тел вращения.

Недостатки:

• Скорость значительно падает в случае печати плоскопараллельных тел, расположенных близко к начальной оси вращения стола.

• Точность не равномерна и сильно падает к периферии.

• Из-за того, что стол должен вращаться, сложно обеспечить его контролируемый нагрев.

• Сложность вычислений и требовательность к системе управления.

3D принтеры кинематики SCARA

Как и Delta, кинематика SCARA пришла в 3D печать из роботов сортировщиков на конвейерных линиях. SCARA кинематика, применяемая в 3D печати, представляет собой механизм, в котором для перемещения конечной

точки используется четыре рычага и два вращающихся привода, объединенных в плоскопараллельную рычажную систему (схема кинематики SCARA представлена на рисунке).

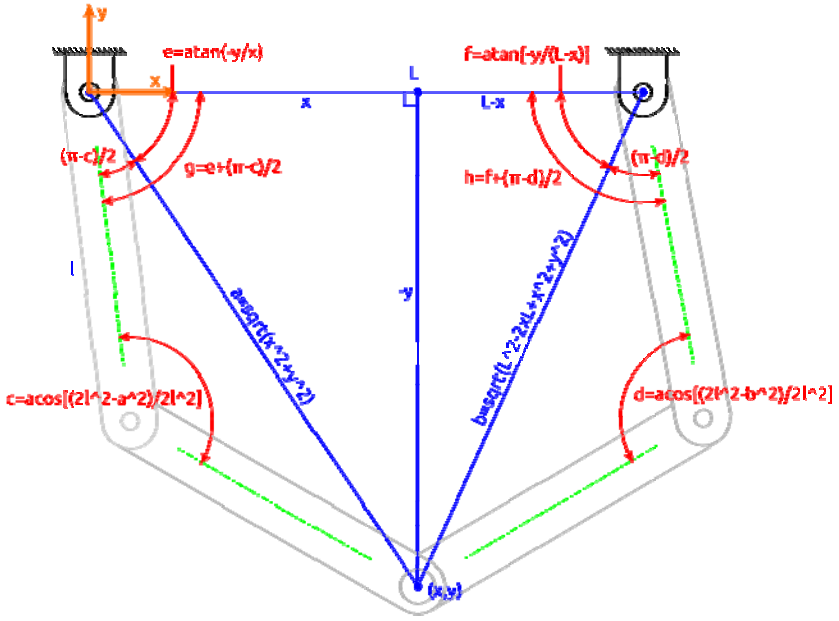


Схема кинематики SCARA

Особенностью данной кинематики является то, что линейные перемещения совершаются только экструдером, плоскопараллельные двумя рычагами, а приводы и еще два рычага, в которых сосредоточена основная масса совершают вращательные движения. Это обуславливает низкую инерционность всей системы, что позволяет добиться больших ускорений и скоростей при использовании одинаковых приводов, по сравнению с картезианской кинематикой.

Преимущество:

• Скорость. Хотя скорость зависит от используемого привода, в общем случае SCARA показывает более высокие скоростные характеристики по сравнению с картезианской и Delta кинематикой.

• Высокая повторяемость результата. Так как в механизме не используются растягивающиеся элементы (приводные ремни), то SCARA может повторять одни и те же действия без потери точности.

Недостатки:

• Неравномерная точность в пределах рабочей области. Максимальная точность достигается в начале координат. По мере удаления от него увеличивается длина рычага SCARA-робота, из-за чего наблюдается снижение точности. Это ухудшение необходимо корректировать программно.

• Требования. SCARA кинематика использует сложное перемещение, что накладывает ограничение на вычислительную мощность контроллера. Рекомендовано использовать 32-х битные платы. Требования к точности изготовления рычагов высоки, так как погрешности имеют накопительный характер.

• Сложность настройки. Обеспечение правильности линейных перемещений требует заведомо более высоких требований к точности изготовления деталей. Либо необходима выработка методики юстировки для 3D принтеров на данной кинематике.

Сравнительный анализ кинематик, используемых в 3Dпринтерах, печатающих по технологии FFF/FDM [1–5] показал, что ортогональные принтеры наиболее часто используются благодаря своей простоте, полярные наиболее проигрышные в этом плане, а Delta и Scara имеют перспективы дальнейшего развития, особенно с учетом того, что в последние годы возросла доступность 32 битных систем управления. Для обоих кинематик требуется разработка методики юстировки в 3D печати, позволяющей выполнять ее в бытовых условиях конечным потребителем без специальных средств измерения.

Результаты данной работы обращают внимание на перспективы достаточно редкого в дан-

ной отрасли кинематического решения – SCARA-робота. Таким образом, образуется задел для дальнейших более глубоких исследований, направленных на расчеты жесткости системы, инерционных характеристик, возможностей программной компенсации недостаточной жесткости системы и методов упрощенной ее юстировки.

Результаты исследования используются в настоящее время при создании лабораторного стенда для проведения испытаний и проверки гипотез и расчетов на практике. Стенд представляет из себя SCARA-робот, где рабочим органом выступает экструдер типа Bowden с возможностью установки измерительных приспособлений. SCARA отвечает за перемещение экструдера в горизонтальной плоскости. Платформа стола может при этом передвигаться вертикально по линейным направляющим.

Полученный лабораторный стенд может также использоваться в учебных целях для ознакомления студентов с кинематикой SCARA в рамках образовательной программы, а также при проведении исследований по повышению эффективности 3D-принтеров.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Borrelli, V.* Kinematic and dynamic analysis of a machine for additive manufacturing: Master's Degree Thesis Mechanical Engineering. - 2018. - 108 с.

2. *Самойлов, В. Б.* Выбор 3D принтера с параллельной кинематикой для самостоятельной работы студентов / В. Б. Самойлов // Машиностроение и компьютерные технологии. – 2017. – № 10. – С. 57–69. URL: http://www.technomagelpub.ru/jour/ article/view/1322 (дата обращения 16.11.2020)

3. *Киселев. В.* 3D-принтеры с разной кинематикой: сравнение, плюсы и минусы / В. Киселев. Текст: электронный // Аддитивные технологии: Интернет-портал – URL: https://additiv-tech.ru/publications/3d-printery-s-raznoy-kinematikoy-sravnenie-plyusy-i-minusy.html (дата обращения: 16.11.2020).

4. Strength Increasing Additive Manufacturing Fused Filament Fabrication Technology, Based on Spiral Toolpath Material Deposition / А. Р. Авдеев, А. А. Швец, И. А. Гущин, И. С. Торубаров, А. В. Дроботов, А. М. Макаров, А. Л. Плотников, Ю. П. Сердобинцев // Machines : [Open Access Journal]. – 2019. – Vol. 7, Issue 3. – 18 p. – doi: 10.3390/machines7030057. – URL : https://www.mdpi.com/ 2075-1702/7/3/57.

5. Методика выбора 3D-принтера на основании технико-экономических показателей / Ю. П. Сердобинцев, А. В. Дроботов, Н. В. Гаврилина, А. Р. Авдеев, А. А. Швец, И. А. Гущин // Вестник машиностроения. – 2017. – № 4. – С. 37–40.

УДК: 681.5.08
DOI: 10.35211/1990-5297-2021-1-248-60-63

П. И. Каландаров[1], А. М. Макаров[2], Г. М. Аралов[1]

ОСОБЕННОСТИ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ИЗМЕРЕНИЯ ВЛАЖНОСТИ ЗЕРНОВЫХ КУЛЬТУР В ПОЛЕВЫХ УСЛОВИЯХ

[1] Ташкентский институт инженеров ирригации и механизации сельского хозяйства
[2] Волгоградский государственный технический университет
E-mail: eest_uz@mail.ru

В статье рассматриваются способы определения зрелости зерна и описывается его поведение при сборе, для оптимизации выбора состояния влажности зерна анализируются предъявляемые требования к выбору метода измерения и проектирования высокочастотного прибора, где предусматривается использование приборного обеспечения контроля влажности зерна, а также его высокой точности и возможности проведения измерений в полевых условиях.

Ключевые слова: зрелость, контроль, влажность, высокочастотный метод, зерно, портативный прибор, диапазон, погрешность, полевые условия.

P. I. Kalandarov[1], A. M. Makarov[2], G. M. Aralov[1]

FEATURES OF GRAIN MOISTUREAUTOMATED MEASUREMENTIN FIELD CONDITIONS

[1] Tashkent Institute of irrigation and agricultural mechanization engineers
[2] Volgograd State Technical University

The article discusses ways to Mature grain properties and describes its behavior during harvesting, to optimize the selection of grain moisture state, and also analyzes the requirements for the selection of methods and design of a high-frequency module, which provides for the use of instrumentation for monitoring grain moisture, as well as their high accuracy and the possibility of conducting measurements in the field.

Keywords: maturity, control, humidity, high-frequency method, grain, portable device, range, error, field conditions.

© Каландаров П. И., Макаров А. М., Аралов Г. М., 2021.

Введение

Сегодня в Республике Узбекистан одним из важных вопросов хранения продуктов агропромышленного комплекса является хранение зерновых культур.

При этом важно помнить о рисках, связанных с отклонением температуры и влажности от требуемых значений. Высокая температура или высокая влажность означают, что зерно подвержено риску заражения насекомыми или роста грибков.

В полевых условиях необходимо контролировать процесс созревания озимой пшеницы, и за ее состоянием следят агрономы. Однако на практике у агрономов часто нет возможности измерить параметры зерна в полевых условиях. Измеряя влажность зерна с помощью измерительных устройств (влагомеров) также обращают внимание на внешний вид и структуру будущего хлеба, на основе этого выносят решение о необходимости начала жатвы.

В последнее время разработчиками приборного обеспечения измерения влажности зерна проектируются микроволновые инструменты для измерения влажности зерна в полевых условиях [1].

Известно, что при измерении влажности зерна действуют стандарты, которые регламентируют 4 состояния зерновой массы по влажности (%):

• сухое – 13–14 %; • средне-сухое – 14,1–15,5 %; • влажное – 15,6–17 %; • сырое – более 17 %.

На долговременное хранение закладывают только сухое зерно.

Степень зрелости пшеницы зависит от содержания влаги в ней.

Выделяют молочную зрелость, когда уровень влажности составляет 60–70 %, наступает на 10–18-й день после начала цветения; восковую зрелость, влажность 35–45 %, наступает через 2 недели по окончании фазы молочной зрелости; полную зрелость, влажность составляет 12–20 %, листья опадают, зерно становится твердым и сухим, начинает осыпаться; прямое комбайнирование, самый распространенный способ жатвы, этот метод уборки пшеницы применяется, когда влажность зерна составляет не более 15 %.

Концепция решения проблемы

С учетом проведенных исследований информационно-измерительные системы приборов контроля влажности сыпучих материалов, например, зерно (пшеница) могут быть синтезированы на базе F-метра. Передающие части схемы включают в себя датчики, автогенераторы и блоки предварительной обработки информации. С помощью двух линий связи передающая часть схемы соединена с приемником, осуществляющим деление частот измерительного и корректирующего каналов. Генераторы должен иметь начальную частоту f=0,5 МГц, на мощных полевых транзисторах с инерционным элементом автоматического смещения в цепи затвора.

Наличие эффекта компенсации влияния активных потерь на основную частоту генератора, достигается при соответствующем выборе параметров цепи автоматического смещения. В соответствии с данными эксперимента это уменьшение заметно лишь при больших сопротивлениях, когда амплитуда колебаний велика и нелинейность вольтамперной характеристики ощутимо сказывается на величине высших гармоник.

Результаты приведенных экспериментальных исследований показали:

– возможность синтезировать новые измерительные блоки приборов автоматизированного контроля влажности материала, обеспечивающего измерений влагосодержание с высокой точностью;

– возможность оптимизировать для такой системы датчики компланарного типа в виде кольцевых электродов;

– отсутствие необходимости введения влияющих факторов и поправки в результаты измерений в реальном диапазоне измерений.

В результате исследований решается актуальная задача синтеза высокочастотного прибора автоматизированного контроля влажности сыпучих материалов (зерна изерновой массы), обладающих высокой экспрессностью контроля и удовлетворяющих метрологическими характеристиками.

Анализ использования портативных влагомеров

На сегодняшний день разработчики проектируют широкий спектр портативных аппаратов для определения влажности сельскохозяйственной продукции.

Однако, с учетом использования рабочего метода определения влажности, определять влаж-

ность в полевых условиях не очень удобно, поэтому допускается применение портативных влагомеров.

В соответствии с заданием контроля влажности необходимо измерение влажности зерна (пшеницы) прозводить в полевых условиях. Существующие приборы контроля влажности, используемые для измерения влажности зерна как при их хранении, так и в полевых условиях, представляют собой широкий спектр измерительных схем и устройств.

Анализируемые влагомеры применяются для экспрессного анализа влажности зерна в лабораторных и полевых условиях при уборке, хранении и переработке зерна, при послеуборочной обработке и сушке зерна, на токах, при размещении зерна в хранилищах, при увлажнении зерна перед помолом.

Отличительной особенностью предлагаемых приборов является удобство его эксплуатации, они выполнены в виде переносных электронных приборов, где показания содержания влаги отображаются в процентах на электронном дисплее, главная особенность прибора – универсальность, возможность работы со многими видами зерна, семян трав без предварительного измельчения,а также муки в широком диапазоне влажности и с очень высокой точностью.В исследованиях рассматриваются решения следующих задач:

– анализ современного состояния методов и приборов измерения влажности зерна в полевых условиях;

– исследование электрофизических характеристик зерна в зависимости от его влажности;

– разработка математической модели процесса электромагнитного взаимодействия ВЧ-волны и влажного зерна;

– исследование влияния информативных и негативных факторов на результаты измерения влажности;

– разработка универсального микропроцессорного портативного влагомера зерна;

– установление основных метрологических характеристик разработанного прибора.

Реализация результатов исследования

Зерновая продукция является многокомпонентными смесями, физические свойства и компоненты которых (F_{ki}) существенно различаются и зависят от ряда факторов [2], в том числе: влажности (W_{ki}), температуры (T_{ki}), особенностей макро- и микроструктуры (S_{ki}), степени зрелости (Z_{ki}), условий хранения и переработки (X_{ki}):

$$F_{ki} = f(W_{ki}, T_{ki}, S_{ki}, Z_{ki}, X_{ki}) \qquad (1)$$

Очевидно, что фактически химические характеристики материала (F_M) зависят от свойств его компонентов (F_{ki}), их количественного соотношения (M_{ij}), взаимного расположения (R_{ij}), количества (N) и объема (V) воздушных включений между ними:

$$F_M = Q(F_{ki}, M_{ij}, R_{ij}, N, V). \qquad (2)$$

Влажность материала (W) определяется как отношение всей массы воды в контролируемом объеме (M_B) к сухой массе этого объема (M):

$$W = \frac{M_B}{M} = \frac{\sum_1^n W_{ki} \cdot M_{ki}}{\sum_1^n M_{ki}} \qquad (3)$$

где (M_{ki}) – масса i – компонента; n – количество компонентов материала.

Согласно [3], отношение $\varepsilon_{0,2} / \varepsilon_{20}$ быстро растет с увеличением влажности W. Известно, что механизм влияния температуры на величину емкости датчика, т. е. на диэлектрическую проницаемость влажного материала, определяется изменением при нагревании соотношения в материале количеств связанной и свободной влаги – где диэлектрическая проницаемость связанной влаги гораздо ниже (≈ 5), чем 81. Для диэлькометрических влагомеров в диапазоне ниже 10^8 Гц влияние температуры можно учесть введением температурной коррекции к результатам измерения по формуле:

$$W = W_П - k_t\left(t - t_0\right), \qquad (4)$$

где W – истинная влажность материала при температуре $t.$; $W_П$ – результат отсчета влажности по шкале; t и t_0 – температура материала соответственно в момент измерения и при градуировке влагомера; k_t – температурный коэффициент для данного материала.

В результате комплексная диэлектрическая проницаемость зерна рассчитывается с использованием следующего выражения:

$$\varepsilon^* = \varepsilon_\infty + \frac{a}{i\omega\varepsilon_0} e^{-\frac{B}{T}} + \sum_i \frac{\varepsilon_{ci} - \varepsilon_{\infty i}}{1 + i\omega A_i \cdot e^{\frac{B_i}{T}}} \qquad (5)$$

С ростом температуры ε при $\omega\tau \succ\succ 1$ увеличивается, так как уменьшается τ и поляризация

за время полупериода приложенного напряжения развивается в большей степени.

Выводы и рекомендации

Рассматривая результаты исследования разработанного прототипа портативного прибора контроля влажности зерна в полевых условиях, рекомендуется учитывать следующие характеристики [4]:

1. Диапазон измерения влажности. Так как влажность свежесобранного зерна обычно не превышает 35 %, а для долговременного хранения его влажность понижают до 13…16 %, то достаточно будет диапазона измерений 5…35 %.

2. Погрешность измерения. Чем она меньше, тем лучше, но в большинстве случаев для влагомеров приемлемой является погрешность от 0,5 до 1 %.

3. Отсутствие зависимости показаний от сорта зерна или, если зависимость показаний имеется, возможность быстрой переградуировки прибора под конкретный сорт исследуемого материала (зерна).

4. Скорость измерения – 2–5 сек.

5. Диапазон рабочей температуры ±5 … +50 °С.

6. Автоматическая термокомпенсация в интервале рабочих температур от 5 до 50 °С.

7. Вместимость измерительной камеры – 300 мл.

8. Электропитание – 9 В.

Данную технологию можно успешно адаптировать для определения содержания воды влажной массы как в зерне, так и в различных сельскохозяйственных продуктах.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Кузнецов, А.* Что вам нужно знать при импорте влагомера [Электронный ресурс]: https://import-v-rossiu.ru / доставка / влагомер (дата запроса: 19.09.2020).

2. Микроволновая термовлагометрия / П. А. Федюнин [и др.]. – М. : Машиностроение, 2004. – 230 с.

3. *Кричевский, Е. С.* Высокочастотный контроль влажности при обогащении полезных ископаемых. – М. : Недра, 1972. – 216 с.

4. *Каландаров, П. И.* Сверхвысокочастотная влагометрия и проблемы метрологического обеспечения / П. И. Каландаров, П. Р. Исматуллаев. – М. : Приборы № 7. – 2011. – С. 40–44.

УДК 621.865
DOI: 10.35211/1990-5297-2021-1-248-63-67

Д. М. Крылов, В. Г. Барабанов, Е. Г. Крылов, Н. В. Козловцева

РАЗРАБОТКА ДИСТАНЦИОННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ РОБОТОМ-МАНИПУЛЯТОРОМ С ПЯТЬЮ СТЕПЕНЯМИ СВОБОДЫ

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

В работе рассмотрена задача усовершенствования взаимодействия с пятиосевым роботом-манипулятором с помощью добавления в систему беспроводного модуля.

Ключевые слова: беспроводное управление, bluetooth, пятиосевой робот-манипулятор.

D. M. Krylov, V. G. Barabanov, E. G. Krylov, N. V. Kozlovtseva

DEVELOPMENT OF A REMOTE ROBOT-MANIPULATOR CONTROL SYSTEM WITH FIVE DEGREES OF FREEDOM

Volgograd State Technical University

In paper the problem of improvement of interaction with the five-axisrobot-manipulator by means of addition in the system of the wireless module is considered.

Keywords: wireless control, bluetooth, five-axis robot manipulator.

В настоящее время робототехника и мехатроника имеют широкое распространение в промышленности. Одним из самых популярных направлений является использование роботизированной руки. Область применения данного устройства довольно обширна особенно в массовом и многосерийном производстве. Лидерами по использованию являются химическая промышленность, металлообработка, автомобильная промышленность, медицина и фармацевтика.

© Крылов Д. М., Барабанов В. Г., Крылов Е. Г., Козловцева Н. В., 2021.

Тенденцией современных технологий является уменьшение присутствия человека в технологическом процессе [1, 2]. При этом все более нарастает популярность систем дистанционного управления оборудованием. Существует различные способы дистанционного управления. Примером могут служить: использование систем ЧПУ, использование удаленных серверов, использования защитных средств, предотвращающих негативное воздействие на человека.

В статье описывается система, позволяющая управлять роботом-манипулятором дистанционно. За основу был взят пяти осевой робот-манипулятор BCN3D Movio в основе которого лежит микропроцессорная система управления на базе ArduinoMega 2560. Данная система позволяет управлять независимо шестью шаговыми электродвигателями, а также сервоприводом с помощью предварительного установленного на PC. Однако данная система имеет один серьезный недостаток. Для отладки и управления роботом необходимо находится с ним в непосредственной близости, что в условиях производства не всегда является возможным и может быть опасно для человека.

Данная задача была решена путем установки bluetooth модуля [3] в микропроцессорную систему управления, который подключается напрямую на плату в специальные разъемы. После подключения bluetooth модуля нужно провести корректировку управляющей программы, чтобы он стал активен для системы. После этого настройку системы управления можно считать завершенной.

Принцип работы устройства.

При включении питания контроллер ArduinoMega 2560 получает информацию от потенциометров и сверяет их с заданным диапазоном. Если местоположение оси входит в диапазон, то можно начинать работу с роботом-манипулятором, если местоположение оси не выходит за границы диапазона, то робот-манипулятор сообщает по bluetooth модулю оператору, что нужно переместить ось в нужное положение и пульт управления блокируется. После того как прошла проверка и ошибка устранена пульт управления разблокируется, работа робота-манипулятора продолжается. Оператор выбирает режим работы (Свободный, Программируемый или готового маршрута). В случае если робот во время работы начинает уходить за границу рабочего диапазона, то программа не дает ему передвигаться дальше, только обратно в рабочий диапазон. По завершению работы оператор отключается от контроллера и выключает питание робота-манипулятора.

Описание режимов работы.

Робот-манипулятор может работать в трех режимах:

Первый режим «Свободный». Данный режим позволяет оператору вручную управлять каждой осью и производить работу с объектами. Этот режим не запоминает местоположение робота-манипулятора.

Второй режим «Программируемый». Данный режим так же позволяет оператору вручную управлять каждой осью и производить работу с объектами, но есть возможность запоминать определенные местоположения робота-манипулятора, при этом информация записывается в отдельном текстовом документе в формате g-cod.Этот режим предназначен для построения маршрута, для дальнейшего его повторения в «режиме готового маршрута».

Третий режим «Готовый маршрут». Данный режим позволяет работать роботу автоматически уже по готовому маршруту, созданному при помощи режима «Программируемый» или написанный вручную с помощью g-cod. Данный ражим считывает текстовый файл с готовым маршрутом, написанный при помощи g-cod,и работает циклично до момента остановки робота-манипулятора.

Описание управляющей программы.

Оператор подключает к сети 220 В робот-манипулятор и вставляет его в вертикальном положении. Далее оператор на своем устройстве заходит в программу и подключается к роботу-манипулятору по протоколу bluetooth. После подключения он выбирает режим: свободный режим, режим программирования или готовый маршрут. В свободном режиме есть кнопки управления роботом, шкала регулировки степени открытия или закрытия устройства захвата и кнопки «отк.» и «закр.». В программированном режиме аналогично есть кнопки управления роботом, шкала регулировки степени открытия или закрытия устройства захвата, кнопки «отк.» и «закр.», а также текстовое окно, где прописываются координаты или степень открытия или закрытия устройства захвата, четыре кнопки: запись, редактирование, удалить и сохранить. В режиме готовый маршрут есть текстовое окно «путь до программы», кнопка «обзор», текстовые окно «код программы», и четыре кноп-

ки: старт, редактировать, проверка и стоп.

На рис. 1 изображена схема общего вида пятиосевого робота-манипулятора с обозначением элементов [4].

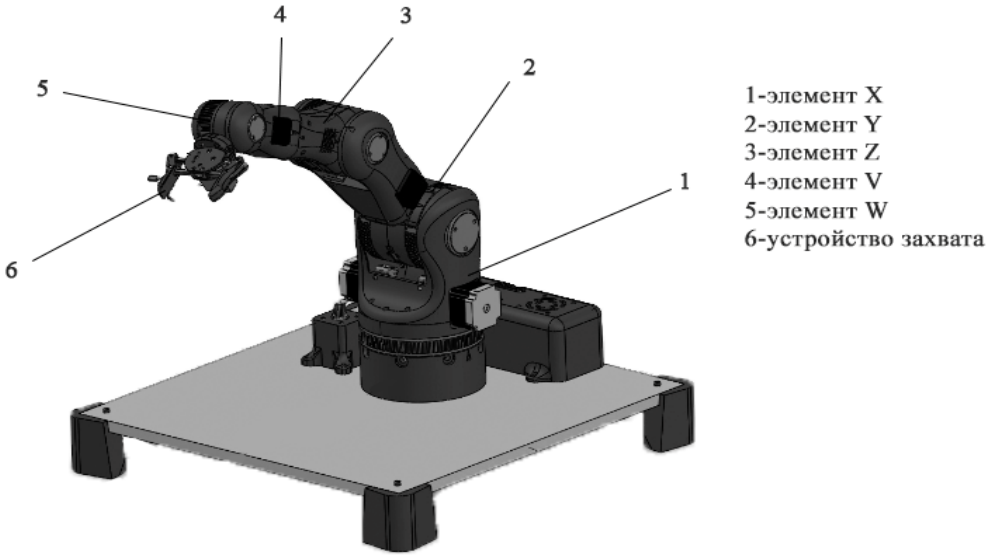


Рис. 1. Робот-манипулятор. Схема общего вида

Рассмотрим назначение кнопок для каждого режима работы.

Свободный режим (рис. 2).

Кнопки *1*, *2* позволяют управлять манипулятором по элементу Z, кнопки *3*, *4* по элементу X, кнопки *5, 6* по элементу W, кнопки *7, 8* по элементу V, при нажатии одновременно кнопок *1* и *5* или *2* и *6* позволяет управлять роботом-манипулятором по элементу Y, при нажатии кнопки «отк.» (*10*) позволяет открывать полностью устройство захвата, кнопка «закр». (*11*) закрывает устройство захвата не полностью, степень изменения сжатия и расжатия (*9*) можно регулировать.

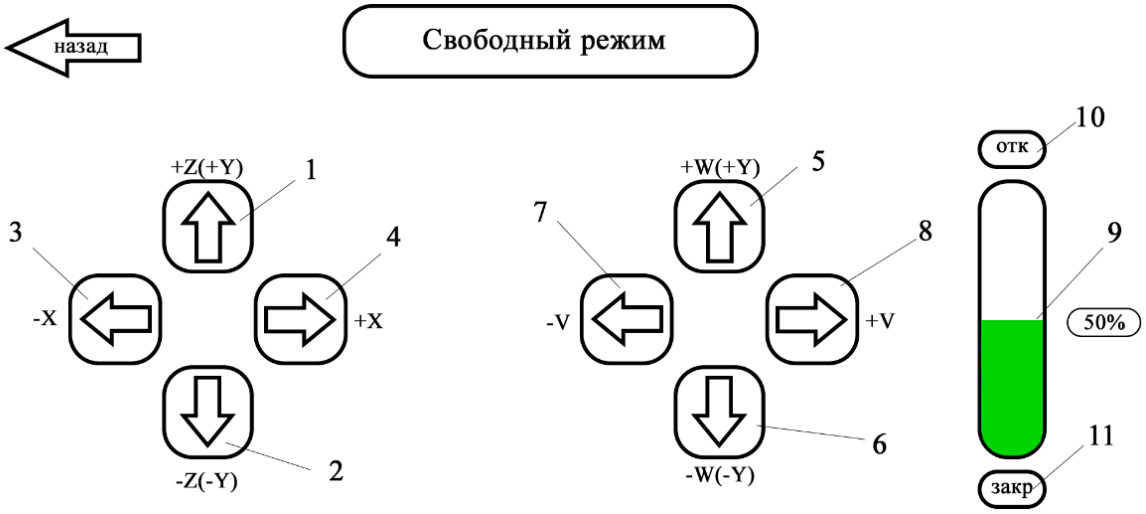


Рис. 2. Свободный режим

Программируемый режим (рис. 3).

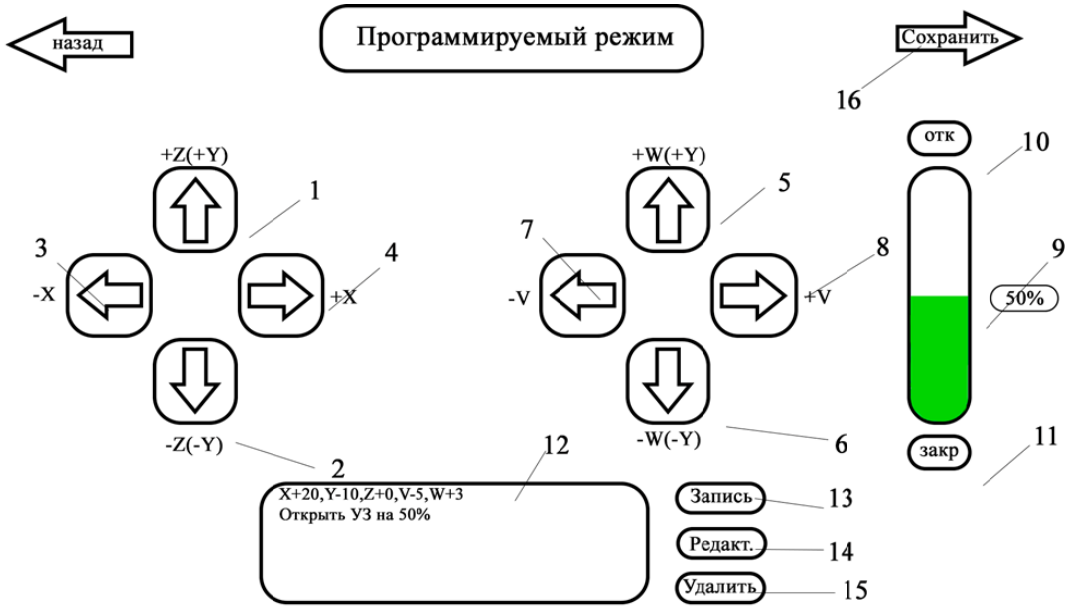


Рис. 3. Программируемый режим

Кнопки управления в программируемом режиме имеют такое же назначение, как и в Свободном режиме. При нажатии кнопки «Запись» (*13*) в текстовое поле (*12*) записывается местоположение робота-манипулятора. Если нажать кнопку «Редакт.» (*14*) можно редактировать любую строчку в этом текстовом пполе. При нажатии кнопки «Удалить» (*15*), удаляется полностью строчка с координатами робота-манипулятора. Кнопка «Сохранить» (*16*) позволяет сохранить проект, сделанный в режиме программирования.

Готовый режим (рис. 4).

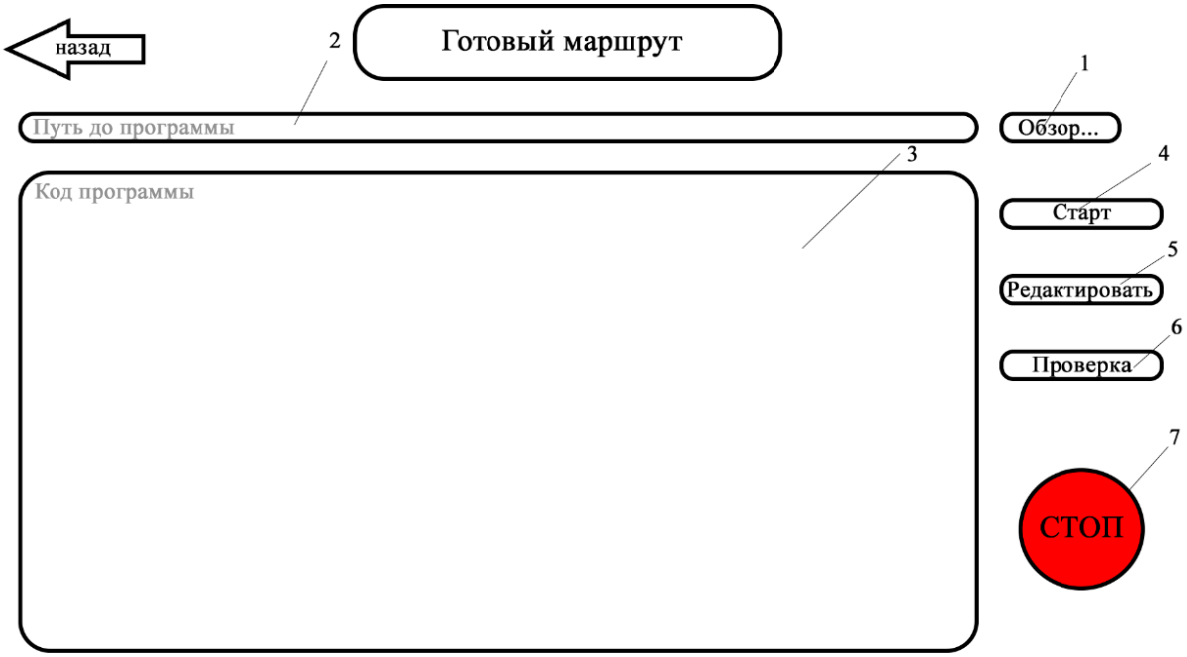


Рис. 4. Режим «Готовый маршрут»

В режиме «Готовый маршрут» есть кнопка «Обзор» (*1*). При нажатии этой кнопки выбирается ранее написанная программа для робота-манипулятора. В текстовом окне «Путь до про-

граммы» (*2*) описывается путь, ее место расположения. В окне «Код программы» (*3*) появляется весь код, который был загруженном в программу в файле. При нажатии на кнопку «Редактировать» (*5*) возможно его изменение. При нажатии кнопки «Старт» (*4*) запускается программа, которая была загружена в устройство. При нажатии кнопки «Проверка» (*6*) происходит проверка программы на наличие ошибок или проверка выхода робота за зону рабочего диапазона. При нажатии кнопки «Стоп» (*7*) отключается рабочий процесс и происходит проверка робота на наличие ошибки.

В результате проделанной работы была проведена доработка системы управления робота-манипулятора путем добавления возможности дистанционного управления, разработана управляющая программа с возможностью визуализации на любом устройстве с сенсорным экраном. Данная система позволяет управлять независимо шестью шаговыми электродвигателями, а также сервоприводом с помощью предварительного установленного программного обеспечения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Андерсон Криста, Минаси Марк*. Локальные сети; Корона-Принт, Энтроп, Век + - Москва, 2013. – 624 с.

2. *Бройдо, В. Л.* Вычислительные системы, сети и телекоммуникации : учеб. для вузов / В. Л. Бройдо, О. П. Ильина. – 4-е изд. – СПб. : Питер, 2011. – 560 с.

3. 3DiY [Электронный ресурс]: Bluetooth модуль HC-05,[2018] – Режим доступа: https://3d-diy.ru/wiki/arduino-moduli/bluetooth-modul-hc-05/

4. Разработка и исследование автоматизированного лабораторного стенда на базе макета промышленного робота типа «рука» / П. А. Чемогонов, А. М. Макаров, В. И. Поцелуйко, В. Г. Барабанов // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 3 (238) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2020. – (Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении». – С. 93–96.

УДК 681.5
DOI: 10.35211/1990-5297-2021-1-248-67-69

М. П. Кухтик, А. И. Репников, Ю. П. Сердобинцев, М. А. Хаустов

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ АВАРИЙНЫХ СИТУАЦИЙ В ОПОРЕ СКОЛЬЖЕНИЯ ГАЗОПЕРЕКАЧИВАЮЩЕГО АГРЕГАТА

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

Разработана структурная схема и принцип работы автоматизированной системы предотвращения аварийных ситуаций в опоре скольжения газоперекачивающего агрегата. Написана программа управления и разработан HMI-интерфейс панели управления оператора.

Ключевые слова: газоперекачивающий агрегат; опора скольжения; автоматизированная система управления; программа управления; HMI-интерфейс.

M. P. Kukhtik, A. I. Repnikov, Yu. P. Serdobintsev, M. A. Khaustov

AUTOMATED SYSTEM OF PREVENTION OF EMERGENCY SITUATIONS IN A SLIDING SUPPORT OF A GAS PUMPING UNIT

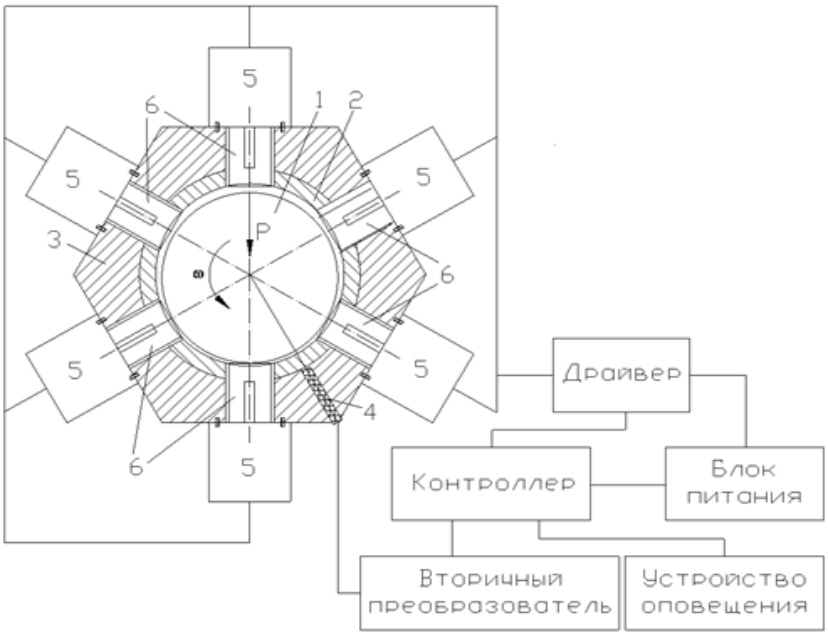
Volgograd State Technical University

Block diagram and operation principle for automated system of prevention of emergency situations in a sliding support of a gas pumping unit have been developed. Control program has been written and HMI-interface of operator control panel has been developed.

Keywords: gas pumping unit; sliding support; automated control system; control program; HMI-interface.

Газоперекачивающие агрегаты (ГПА) относятся к основному технологическому оборудованию компрессорных станций. ГПА обеспечивают необходимый режим транспортировки газа по магистральному газопроводу. Основная доля отказов ГПА приходится на подшипниковые узлы и уплотнения [1]. С целью предотвращения разрушения опоры скольжения в ГПА разработана автоматизированная система предотвращения аварийных ситуаций, структурная схема которой представлена на рисунке.

© Кухтик М. П., Репников А. И., Сердобинцев Ю. П., Хаустов М. А., 2021.



Структурная схема автоматизированной системы предотвращения аварийных ситуаций в опоре скольжения ГПА:
1 – вал; *2* – втулка; *3* – корпус подшипника; *4* – датчик температуры; *5* – шаговые электродвигатели; *6* – антифрикционные вкладыши

Как правило, при нормальной работе опоры скольжения ГПА преобладает режим гидродинамического трения [2, 3]. При нарушениях гидродинамического режима трения из-за нарушения системы смазки или других причин режим трения между валом *1* и втулкой *2*, установленными в корпусе подшипника *3*, переходит сначала в режим смешанного трения и даже граничного, что приводит к схватыванию поверхностей тел *1* и 2. При этом возрастает температура в зоне их контакта, что фиксируется датчиком температуры *4* (например, термопарой). Электрический сигнал с датчика температуры в диапазоне от 4 до 20 мА поступает в модуль аналоговых входов программируемого логического контроллера (ПЛК). Этот диапазон выбран для того, чтобы существовала возможность отслеживания состояния датчика температуры. Поэтому при обрыве датчика или при коротком замыкании в нем контроллер сформирует дискретный сигнал сообщения о неисправности.

При достижении определенного значения температуры, которое задается оператором вручную с помощью HMI-интерфейса, программа управления начинает формировать импульсные сигналы, поступающие с импульсного быстродействующего модуля ПЛК в модуль управления (драйвер) шаговыми электродвигателями (ШЭД) *5*. При получении этих сигналов драйвер управления начинает изменять значение тока в обмотках электродвигателей, вследствие чего их валы начинают поворачиваться на заданное значение угла в соответствующем направлении вращения.

При вращении валов ШЭД поступательно смещаются вкладыши *6*, выполненные из полимерного антифрикционного материала, имеющего низкий коэффициент трения о сталь [4]. Смещение вкладышей происходит на величину, равную толщине слоя смазочной (или, как ее зачастую называют, антифрикционной) пленки (слоя). Вкладыши упираются в вал и снимают часть нагрузки с втулки *2* подшипника, что снижает ее износ. При этом втулка *2* сохраняет свою направляющую функцию, а несущая функция, которой обладает вал *1*, частично передается на вкладыши.

В ситуации, если значение температуры в зоне контакта вала *1* и втулки *2* превышает введенную уставку дольше определенного интервала времени (который также задается с HMI-панели оператора), то контроллер подает дискретный сигнал на останов ГПА со своего цифрового выхода. Одновременно с этим на HMI-панели оператора появится сообщение о том, что произошло превышение температуры и ГПА был остановлен. Также с помощью звуковой сигнализации, встроенной в панель оператора, произойдет звуковое оповещение.

В программной среде PCWorx создана программа управления, реализующая алгоритм работы автоматизированной системы предотвращения аварийных ситуаций в опоре скольжения ГПА [5]. Часть программы написана на структурированном языке ST (основной алгоритм программы и связь ПЛК с панелью оператора), а часть – на языке функциональных блоков FBD (связь между функциональными блоками счетчика шагов ШЭД, считывание и преобразование в реальную величину значения с датчика температуры).

Кроме того, разработан человеко-машинный HMI-интерфейс для сенсорной графической панели оператора, позволяющий визуализировать состояние автоматизированной системы и осуществлять управление [5]. В этом интерфейсе предусмотрена защита от несанкционированного доступа, возможность хранения архивов событий и аварий, а также ввода уставок (времени, количества шагов ШЭД и предельных значений температур).

Внедрение разработанной системы позволит предотвратить выход из строя дорогостоящего технологического оборудования компрессорных станций.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Свердлов, А. Б.* Повышение надежности газоперекачивающих агрегатов путем применения технологии эпиламирования / А. Б. Свердлов // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. – 2014. – № 3 (202). – С. 62–69.

2. Модель контактных деформаций в паре «вал-втулка» подшипника скольжения газоперекачивающего агрегата / Ю. П. Сердобинцев [и др.] // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 1 (224) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2019. – (Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении»). – С. 76–78.

3. Модель динамического скольжения вала во втулке подшипника газоперекачивающего агрегата / Ю. П. Сердобинцев [и др.] // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 8 (231) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2019. – (Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении»). – С. 79–81.

4. *Репников, А. И.* Автоматизированная система предотвращения аварийных ситуаций в опорах скольжения газоперекачивающих агрегатов / А. И. Репников // XXIV Региональная конференция молодых ученых и исследователей Волгоградской области. Волгоград, 3–6 декабря 2019 г. : сб. материалов конф. / ВолгГТУ ; редкол. : С. В. Кузьмин (отв. ред.) [и др.]. – Волгоград, 2020. – С. 92–93.

5. *Репников, А. И.* Автоматизированная система аварийного останова газоперекачивающего агрегата / А. И. Репников, М. П. Кухтик, Ю. П. Сердобинцев // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 3 (238) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2020. – (Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении»). – С. 79–82.

УДК 681.586.35: 621.791.75
DOI: 10.35211/1990-5297-2021-1-248-69-72

Г. Н. Овчинников, С. В. Шостенко

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУЙНЫХ ПЕРВИЧНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ПОЛОЖЕНИЯ СТЫКА ПРИ ПРОВЕДЕНИИ СВАРКИ ТОНКОСТЕННЫХ ИЗДЕЛИЙ

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

Рассмотрены основные виды первичных струйных пневмопреобразователей, используемых при аргонодуговой сварке тонкостенных изделий, толщиной не более 0,6 мм. Были исследованы статические характеристики пневмопреобразователей с цилиндрическим и щелевым соплами. В ходе анализа результатов был выбран наиболее подходящий пневмопреобразователь, который обладает наибольшей чувствительностью.

Ключевые слова: пневмопреобразователь, тонкостенные изделия, сварка, статические характеристики.

G. N. Ovchinnikov, S. V. Shostenko

RESEARCH OF JET PRIMARY CONVERTERS OF JOINT POSITION WHEN WELDING THIN-WALLED PRODUCTS

Volgograd State Technical University

The main types of primary jet pneumatic converters used in argon-arc welding of thin-walled products with a thickness of no more than 0.6 mm are considered. Were investigated the static characteristics of pneumatic converters with cylindrical and slotted nozzles. During the analysis of the results, the most suitable pneumatic transducer was selected, which has the highest sensitivity.

Keywords: pneumatic transducer, thin-walled products, welding, static characteristics.

© Овчинников Г. Н., Шостенко С. В., 2021.

В современной промышленности важную роль играют различные тонкостенные (малогабаритные) изделия, которые используются в трубопроводной промышленности, а также в приборостроении в виде различных чувствительных элементов. Для создания данных конструкций, толщина которых составляет не более 0,6 мм, существуют различные методы изготовления. Наиболее распространенным является способ, при котором сборка изделий осуществляется с помощью аргонодуговой сварки с отбортовкой. Такой метод сварки позволяет сваривать тонкостенные конструкции из нержавеющей стали, меди и латуни. При их изготовлении требуется высокоточная сварка, которая осуществляется за счет применения датчиков контроля положения детали. По результатам проведенного анализа пришли к выводу, что пневматические датчики являются наиболее универсальными в использовании за счет осуществления бесконтактного контроля положения, при этом обладающие высокой точностью и простотой конструкции.

Далее были рассмотрены несколько видов первичных пневматических преобразователей: преобразователь сопло-заслонка, полукольцевой пневматический преобразователь (Пат. 1444565, МПК F 15 C 1/04. Струйный датчик приближения), щелевой пневматический преобразователь [1].

При проведении сварки тонкостенных изделий с отбортовкой для контроля положения сварочного инструмента необходима пневматическая следящая система на основе первичного пневматического преобразователя. Однако, проблема создания данных систем позиционирования с заранее заданными статическими и динамическими характеристиками следует решать на основе аналитического определения основных параметров устройств, составляющих пневмосистему. Недостаточная освещенность данного вопроса потребовала проведения теоретических исследований конкретных типов струйных первичных преобразователей, которые могут быть использованы в пневмосистеме ориентации электрода при сварке тонкостенных изделий. С целью определения возможности применения данных преобразователей в пневматических следящих системах для сварки тонкостенных изделий были проведены аналитические исследования их статических характеристик.

Анализ статистических характеристик первичных преобразователей был проведен на примере схемы с открытым измерительным соплом. Исследуемый пневмодатчик (рис. 1) включает в себя два турбулентных цилиндрических дросселя типа жиклер: d_1 – постоянного сечения, d_2 – переменного сечения, образованный торцем сопла и заслонкой (поверхностью свариваемого тонкостенного изделия).

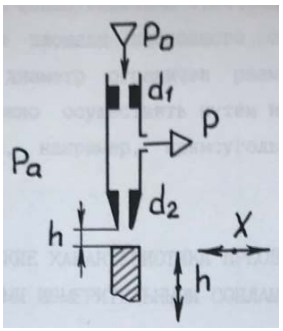


Рис. 1. Пневмопреобразователь с цилиндрическими соплами

Для преобразователей указанного типа течение воздуха через дроссели можно принять адиабатическим [2, 3]. Считая заслонку тонкой кромкой (0,6 мм), торцевая поверхность которой абсолютно перпендикулярна оси измерительного сопла, в расчетах принимались как константы следующие величины: P_0 = 0,2 МПа – абсолютное давление питания преобразователя; $P_а$ = 0,103 МПа – абсолютное атмосферное давление; P = 0,11 МПа… P_0 – пределы изменения абсолютного значения давления в междроссельной камере преобразователя [4].

Для упрощения расчетов коэффициенты расхода α_1 через дроссели также принимались постоянными α_1 = 0,8; α_2 = 0,4. Их численные значения определялись по графику $\alpha = f(h)$, где h – измерительный зазор преобразователя [3].

Исследуемая комбинация различных значений диаметров входных и выходных дросселей представлена в табл. 1.

Таблица 1

Различные значения диаметров дросселей

№	d_1, мм	d_2, мм
1	0,3	0,3
2	0,3	0,4
3	0,3	0,5
4	0,25	0,5
5	0,2	0,5

Так как отношение давлений $P_а/P_0 \geq 0,5$, то всегда имеет место докритическое течение через оба дросселя.

Массовый расход для докритического режима истечения через дроссели с достаточной точностью можно определить по приближенным формулам [2, 3]. Учитывая равенство расходов газа и приняв допущение, что температура газа в проточной емкости постоянна получим:

$$h = \frac{\alpha_1 d_1^2}{4\alpha_2 d_2}\sqrt{\frac{P_0(P_0-P)}{P(P-P_a)}}, \qquad (1)$$

где d_1 – диаметр входного дросселя; d_2 – диаметр выходного дросселя.

На рис. 2 представлено семейство статических зависимостей $P = f(h)$, рассчитанных по формуле (1).

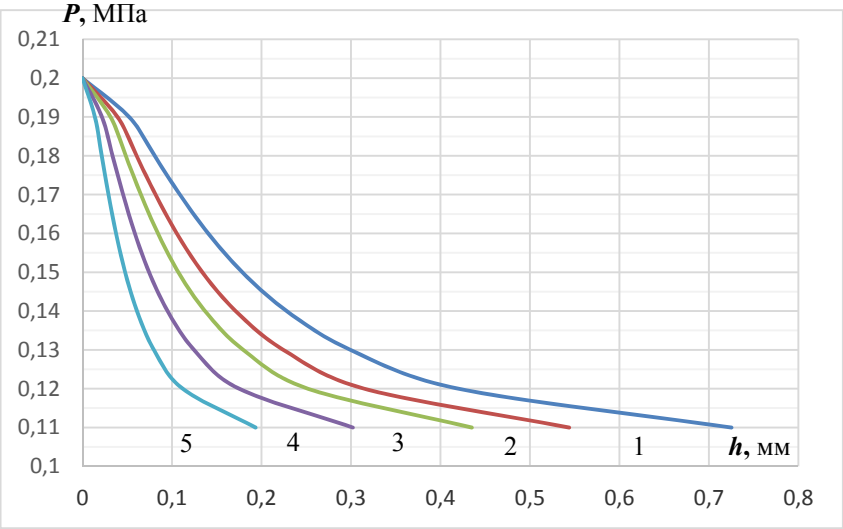


Рис. 2. Статические характеристики $P = f(h)$ пневмопреобразователей с цилиндрическим измерительным соплом

Анализ зависимостей показывает, что с уменьшением диаметра d_2 заметно снижается чувствительность преобразователя и даже для случая *3* (табл. 1) не превышает 500 Па/мкм. Уменьшение d_1 не дает ощутимых результатов. Чувствительность при этом увеличивается незначительно и в случае *5* составляет примерно 950 Па/мкм. Измерительный зазор также невелик и на линейном участке характеристик ограничен максимальным значением 110 мкм (кривая *1*).

Таким образом, результаты проведенного анализа статических характеристик первичных преобразователей с цилиндрическими дросселями малого сечения свидетельствуют о наличии у данных устройств ряда недостатков, препятствующих их практическому использованию при дуговой сварке тонкостенных изделий.

Далее проводится исследование статических характеристик преобразователей с щелевыми измерительными соплами. Исследуемый пневмодатчик (рис. 3) включает в себя входное цилиндрическое сопло d_1 и измерительное сопло d_2 щелевого типа. Исследовалась статическая зависимость изменения давления на выходе преобразователя от величины измерительного зазора.

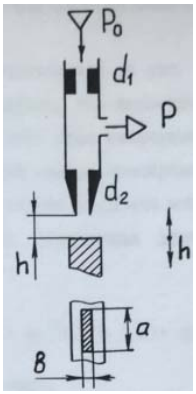


Рис. 3. Пневмопреобразователь с щелевым измерительным соплом

Преобразовав выражение (1), выведем формулу для первичного преобразователя с прямоугольным в сечении измерительным соплом. В статике при тех же допущениях, что и в предыдущем исследовании имеем:

$$h = \frac{\alpha_1 \pi d_1^2}{8\alpha_2(a+b)}\sqrt{\frac{P_0(P_0-P)}{P(P-P_a)}}. \qquad (2)$$

где α_1, α_2 – коэффициенты расхода воздуха через входной и выходной дроссели соответственно; a, b – размеры щелевого измерительного сопла в сечении.

Значения констант уравнения (2) выбирались следующими: a = 0,7 мм; b = 0,2 мм (приняты по конструктивным соображениям); α_1 = 0,8; α_2 = 0,3 (определены по графику $\alpha = f(h)$). [3]

Исследуемая комбинация различных значений диаметров входного дросселя с уровнем P_0 представлены в табл. 2.

Таблица 2

Различные значения диаметров входного дросселя и уровня P_0

№	d_1, мм	P_0, МПа
1	0,2	0,18
2	0,2	0,20
3	0,2	0,22
4	0,3	0,18
5	0,3	0,20
6	0,3	0,22

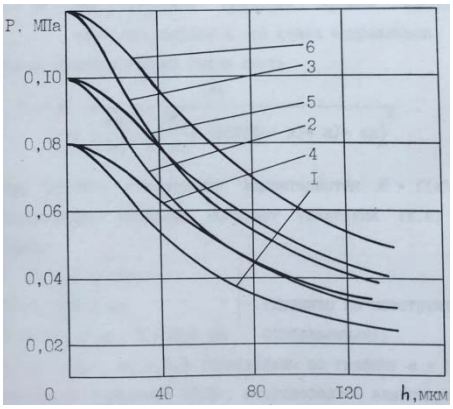


Рис. 4. Статические характеристики $P = f(h)$ однощелевого пневмопреобразователя

На рис. 4 показано семейство зависимостей $P = f(h)$, рассчитанных по формуле (2). Величина P по оси ординат соответствует манометрическому давлению на выходе преобразователя, а указанные позиции кривых – номеру исследуемой комбинации (табл. 2).

Анализ полученных зависимостей показал, что существенное влияние на крутизну характеристики при данных размерах дросселей оказывает величина давления питания. Получена достаточно высокая чувствительность (например, для случая *6* табл. 2 она составляет до 1000 Па/мкм). Протяженность линейных участков не превышает значения 25–30 мкм. Сравнивая характеристики, представленные на рис. 2 и 4 можно сделать вывод, что при одном и том же уровне давления питания исследуемый щелевой пневмопреобразователь допускает работу при более высоком измерительном зазоре по сравнению с цилиндрическими.

В ходе проведенного аналитического исследования статических характеристик струйных преобразователей было выявлено, что наиболее оптимальным является щелевой преобразователь, т.к. он допускает работу при более высоком измерительном зазоре по сравнению с датчиками сопло-заслонка с цилиндрическими соплами.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пат. 1444565 Российская Федерация, МПК F 15 C 1/04. Струйный датчик приближения / В. Я. Бронштейн, А. М. Касимов; заявитель и патентообладатель Институт проблем управления (автоматики и телемеханики). – № 4253802; заявл. 28.04.87 ; опубл. 15.12.88, Бюл. № 46

2. *Ибрагимов, И. А.* Элементы и системы пневмоавтоматики : учеб. пособие для втузов / И. А. Ибрагимов, Н. Г. Фарзане, Л. В. Илясов. – М. : Высшая школа, 1975. – 360 с.

3. *Дмитриев, В. Н.* Основы пневмоавтоматики / В. Н. Дмитриев, В. Г. Градецкий. – М. : Машиностроение, 1973. – 360 с.

4. *Цидулко, Ф. В.* Выбор параметров пневматических приборов размерного контроля в машиностроении. Библиотека приборостроителя / Ф. В. Цидулко. – М. : Машиностроение. – 144 с.

УДК 654.071.3
DOI: 10.35211/1990-5297-2021-1-248-73-76

А. С. Панюлайтис, В. Г. Барабанов, П. С. Васильев

АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ УСТРОЙСТВО ИСПАРИТЕЛЬНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ МЕТОДИЧЕСКИХ ПЕЧЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ФОРСУНОК

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

Разработано новое устройство испарительного охлаждения методических печей. Описан процесс разработки. Разработана схема данного устройства. Дано описание основных элементов системы. Описаны основные преимущества использования гидравлических форсунок. Подробно описан процесс работы устройства.

Ключевые слова: испарительное охлаждение, методические печи, форсунки, охлаждение, металлургия.

A. S. Panuylaitis, V. G. Barabanov, P. S. Vasiliev

AUTOMATED DEVICE FOR EVAPORATIVE COOLING OF METHODICAL FURNACES USING HYDRAULIC INJECTORS

Volgograd State Technical University

A new device for evaporative cooling of continuous furnaces has been developed. The development process is described. A diagram of this device has been developed. The description of the main elements of the system is given. Theadvantages of using hydraulic nozzles are described. The process of device operation is described in detail.

Keywords: evaporative cooling, method furnaces, nozzles, cooling, metallurgy.

Надежная работа металлургической печи зависит от качества огнеупорных материалов, конструкции и стойкости охлаждаемых элементов и осуществима только при правильном охлаждении. Система охлаждения существенно влияет на конструкцию печи, ее фундаментальность и надежность.

Для охлаждения элементов печей, находящихся в зоне высоких температур, на металлургических заводах используют воду. Расход воды, идущей на охлаждение, в среднем составляет 95 % общего расхода, затрачиваемого на технические нужды.

Охлаждение элементов и узлов металлургических печей, работающих в тяжелых температурных условиях, позволяет:

– предохранять их от прогара;

– повышать стойкость кладки;

– обеспечивать неизменность профиля печи;

– поддерживать температуры элементов в пределах, не допускающих разрушения и износа материала;

– создавать температурные условия, необходимые для образования защитных оболочек у стенки элемента (гарнисаж).

Нагревательные печи для обеспечения нижнего подогрева слитков оборудованы подовыми трубами, охлаждаемыми водой. Вследствие перерыва в подаче охлаждающей воды происходит перегрев труб, что требует остановки печи на ремонт.

Современное качество огнеупоров не может обеспечить длительную стойкость передней стенки печи, а ремонт ее – операция весьма трудоемкая.

Испарительное охлаждение металлургических печей в настоящее время является наиболее совершенным и экономичным. Применение его увеличивает срок службы металлургических печей и повышает надежность их работы, устраняет прогар деталей, сокращает расход охлаждающей воды и дает возможность использовать тепло

При испарительном охлаждении металлургических печей используют в основном скрытую теплоту парообразования для отвода тепла от охлаждаемых деталей. Применяемую обычно холодную охлаждающую воду заменяют кипящей, отвод тепла осуществляется за счет выхода пара.

Тепло, отбираемое водой, затрачивается на ее испарение. Так как скрытая теплота парообразования составляет ~540 ккал/кг при атмосферном давлении, то каждый килограмм воды, испаряясь, отбирает от стенки охлаждаемой детали 540 ккал.

© Панюлайтис А. С., Барабанов В. Г., Васильев П. С., 2021.

Так как и при испарении, и при кипении жидкость претерпевает фазовый переход, то кипение (в узком смысле) можно с некоторым допущением считать разновидностью или режимом испарения (в широком смысле).

В зависимости от плотности теплового потока, подводимого к жидкости через соприкасающуюся с ней поверхностью нагрева, на последней образуются отдельные паровые пузыри или сплошной слой пара. Процесс образования пара в виде пузырей, возникающих на отдельных местах поверхности нагрева (центрах парообразования), называют пузырьковым (ядерным) кипением. Процесс, сопровождающийся возникновением сплошного слоя пара между поверхностью нагрева и жидкостью, называют пленочным кипением.

При пузырьковом кипении жидкость непосредственно омывает поверхность нагрева между действующими центрами парообразования, причем ее пограничный слой перемешивается образующимися внемпаровыми пузырями [1]. Вследствие этого интенсивность теплоотдатчика жидкости при пузырьковом кипении весьма велика и возрастает с увеличением числа действующих центров парообразования. При пленочном кипении жидкость отделена от поверхности нагрева слоем малотеплопроводного пара, вследствие чего интенсивность теплоотдатчика много раз меньше, чем при пузырьковом кипении. По этой причине переход от пузырькового режима кипения к пленочному, при неизменной плотности теплового потока, сопровождается резким возрастанием температуры поверхности нагрева [3].

Теплообмен при сфероидальном состоянии жидкости подробно изучался В. М. Боришанским и С. С. Кутателадзе [2, 4]. Именно они впервые исследовали испарение больших навесок жидкости и обнаружили эффект существования пузырчатых сфероидов. На рис. 1 представлена зависимость времени полного испарения небольшой капли жидкости от величины температурного напора, а на рис. 2 – различные формы жидких сфероидов, образующихся на поверхности нагрева.

Левые ветви зависимости $\tau=f(\Delta t)$ соответствуют интервалу температурного напора, при котором жидкость в капле смачивает поверхность нагрева и в ней наблюдается пузырьковое кипение (рисунок 2, *а*). Интенсивность теплоотдачи такого режима испарения велика и еще больше увеличивается с ростом температурного напора и, соответственно, с уменьшением времени испарения.

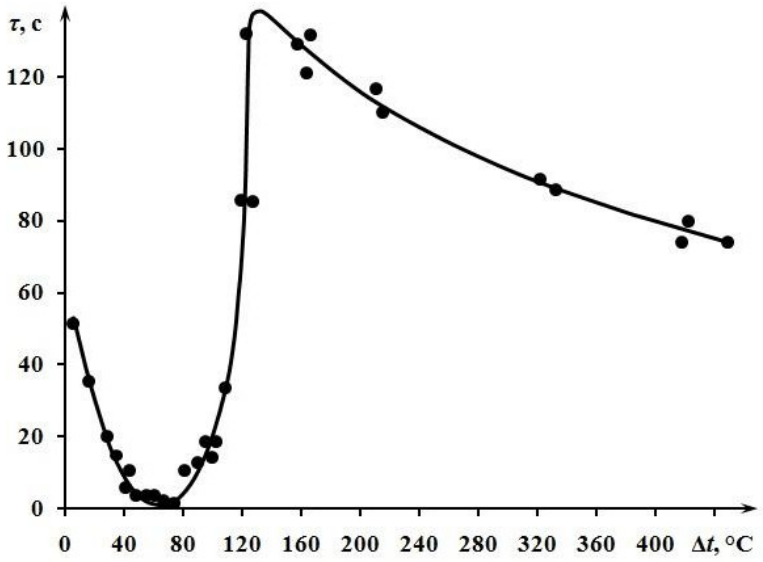


Рис. 1. Зависимость времени испарения от температурного напора $\eta=f(\Delta t)$ капли воды размером $d_к$=4,46 мм на поверхности нагрева

При некотором значении температурного напора (в рассматриваемом случае при $\Delta t_{кр1}$≈67 °С) капля перестает растекаться и начинает принимать сфероидальную форму (рис. 2, *б*), а время испарения начинает увеличиваться с ростом температурного напора. В начале перехода капли в сфероидальное состояние наблюдается прерывистое контактирование жидкости с поверхностью нагрева, а интенсивность теплоотдачи начинает уменьшаться с ростом температурного напора.

При некотором значении температурного напора (в рассматриваемом случае при $\Delta t_{кр2}$≈

≈127 °С) жидкость окончательно теряет возможность контакта с поверхностью нагрева, интенсивность теплоотдачи стабилизируется на относительно низком уровне, а время испарения снова начинает уменьшаться с ростом температурного напора, но медленнее, чем в интервале его значений, соответствующих смачиванию поверхности нагрева жидкостью. Данная область соответствует устойчивому сфероидальному состоянию жидкости.

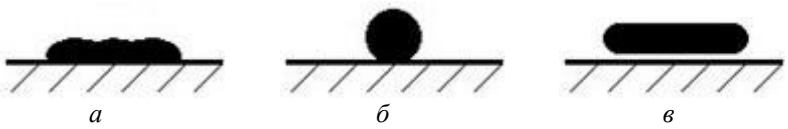


Рис. 2. Различные формы жидких сфероидов, образующихся на поверхности нагрева по данным:
а – смачивание каплей жидкости поверхности нагрева; *б* – начало перехода капли в сфероидальное состояние;
в– образование плоского сфероида при увеличении объема жидкости в капле

С увеличением объема жидкости в капле сфероид становится все более плоским (рис. 2, *в*), и наступает момент, когда его толщина практически стабилизируется и перестает зависеть от количества жидкости. Дальнейшее увеличение объема сфероида приводит к тому, что пар, образующийся на его нижней поверхности, не успевает вытекать по периферии и начинает спорадически прорываться в виде больших пузырей через толщу жидкости [3].

По анализу зависимости времени испарения от температурного напора и стадий испарения капли можно сделать вывод, что для наибольшего отвода тепла от глиссажных и подовных труб, необходимо чтобы переход (испарение) капли воды происходил именно из сфероидального состояния. Из этого вывода понятно, что нельзя заливать трубы технической водой, а наоборот давать каплям испариться и вывести наибольшее количества тепла от деталей методической печи.

Для данного условия работы системы испарительного охлаждения необходимо распылять капли технической воды на глиссажные и подовные трубы из специально подобранных гидравлических форсунок, которые помогают доставить капли и равномерно распределить их количество по трубам. Примерная схема установки испарительного охлаждения методических печей с использованием гидравлических форсунок показана на рис. 3.

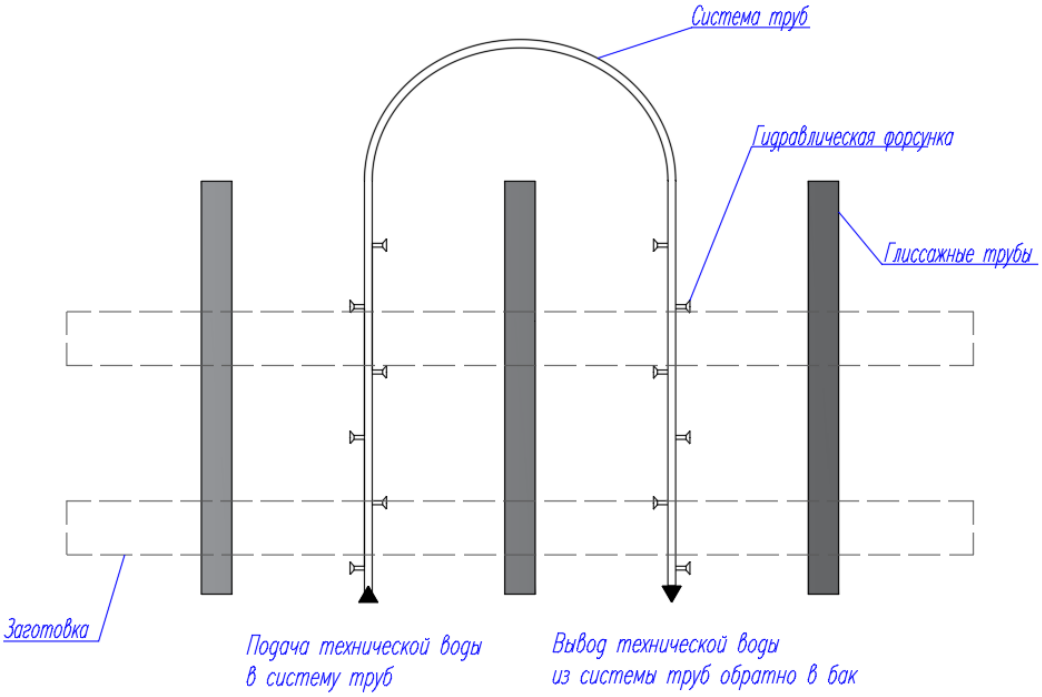


Рис. 3. Схема автоматизированной системы испарительного охлаждения
с использованием гидравлических форсунок

Для правильной и эргономичной работы данной системы необходимо установить датчики, поставить подходящий насос и установить систему управления данным оборудованием, то есть автоматизировать данный процесс, что позволит устройству испарительного охлаждения работать в определенных режимах, зависящая от количества заготовок, температуры труб, размера капель и т. д.

Данная установка позволит сократить расходы технической воды для работы системы испарительного охлаждения, при этом эффективность данного охлаждения возрастет примерно в 1,4 раза (700 ккал).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Патанкар, С.* Тепло- и массообмен в пограничных слоях / С. Патакар, Д. Сполдинг ; пер. с англ. З. П. Шульмана, Г. Н. Пустынцева ; под ред. А. В. Лыкова. – М. : Энергия, 1971. – 128 с.

2. *Кутателадзе, С. С.* Теплопередача при конденсации и кипении / С. С. Кутателадзе. – 2-е изд., доп. и перераб. – М. ; Л. : Машгиз, 1952. – 233 с.

3. *Васильев, П. С.* Теплообмен при капельном кипении жидкости в технологических аппаратах : дис. канд. тех. наук: 05.17.08: защищена 12.02.18: утв. 15.02.18 / Васильев Петр Сергеевич. – Волгоград, 2018. – 245 с.

4. *Боришанский, В. М.* Некоторые данные об испарении жидкости, находящейся в сфероидальном состоянии / В. М. Боришанский, С. С. Кутателадзе // ЖТФ. – 1947. – Т. 17. – Вып. 8. – С. 891–902.

УДК62-527.7
DOI: 10.35211/1990-5297-2021-1-248-76-79

Г. Ю. Прокудин[1], А. В. Нелюбова[1], Н. Г. Шаронов[2]

ПОВЫШЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ УСТАНОВОК ДЛЯ ЛИТЬЯ РЕАКТОПЛАСТОВ ПОСРЕДСТВОМ ВНЕДРЕНИЯ НАГРЕВАЮЩИХСЯ ЛИТЬЕВЫХ ФОРМ*

[1] Волгоградский государственный технический университет
[2] Центр технологий компонентов робототехники и мехатроники, Университет Иннополис
E-mail: jura.prokudin@yandex.ru

Приводятся результаты внедрения нагреваемой литьевой формы в оборудование по автоматизированному литью деталей из реактопластов,влияния нагрева литьевой формы на скорость полимеризации отливаемых деталей.

Ключевые слова: литье реактопластов, нагрев литьевой формы, пластмассовые детали.

G. Yu. Prokudin[1], A. V. Nelyubova[1], N.G. Sharonov[2]

PRODUCTIVITY INCREASE OF EQUIPMENT FOR CASTING OF THERMOSETS THROUGH THE INTRODUCTION OF HEATED INJECTION MOLD

[1] Volgograd State Technical University
[2] Center for Technologies in Robotics and Mechatronics Components, Innopolis University

The results of the introduction of a heated injection mold into the equipment for automated casting of parts from thermosets are presented. The results of the influence of injection mold heating on the polymerization rate of cast parts are obtained.

Keywords: injection molding of thermoplastics, heating of the injection mold, plastic parts.

Введение

Современные особенности производства демонстрируют, что для таких многих отраслей, например для приборостроения, необходимы технологии рентабельного производства продукции малыми сериями или даже штучно. В приборостроении преобладающие число компонентов продукции изготовлено из пластика (корпуса, рукоятки переключения и т. п.). Однако, достичь низкой себестоимости при изготовлении таких деталей не удается в связи с использование в большинстве своем технологии литья термопластов под давлением. Данная технология рентабельна при массовом произ-

© Прокудин Г. Ю., Нелюбова А. В., Шаронов Н. Г., 2021.

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 18-71-10069).

водстве, однаконе подходит при изготовлении продукции небольшими сериями в связи с существенной стоимостью литьевых форм.

Активно развивающаяся технология аддитивного производства [1] деталей из пластика применима при изготовлении прототипов деталей и слабонагруженных компонентов, в связи с послойным формированием изделия.

Технология производства пластмассовых деталей литьем реактопластов позволяет изготавливать пластмассовые детали, стойкие к высоким температурам и агрессивным химическим средам, по более низкой себестоимости по сравнению с разработанными на сегодняшний день технологиями [2, 3]. Данная технология применяется в автомобилестроении, приборостроении, космической промышленности, однако существующие литьевые установки обычно предполагают литье в формы без одновременного нагрева, а при необходимости поддержания заданного температурного режима используется отдельное нагревательное оборудование.

Постановка задачи

Рассматривается задача обеспечить литье и нагрев отлитой детали в одной автоматизированной литьевой установки, не прибегая к дополнительному оборудованию и переносу литьевой формы в печь. Задачей данного исследования является разработка литьевой формы, обеспечивающей нагрев отлитой детали и проведение испытаний, позволяющих выявить закономерности влияния нагрева отлитой детали на производительность установки в целом [3, 4].

Описание работы литьевой установки

Оператор литьевой установки [5, 6] наполняет емкость 11 компонентом А, а емкость смешивания *14* – компонентом Б, размещает нагревающуюся силиконовую форму *17* и соединяет литьевой канал и воронку *8* шлангом, задвигает столик с креплениями *7*, закрывает дверь *2* и включает камеру (рис. 1).

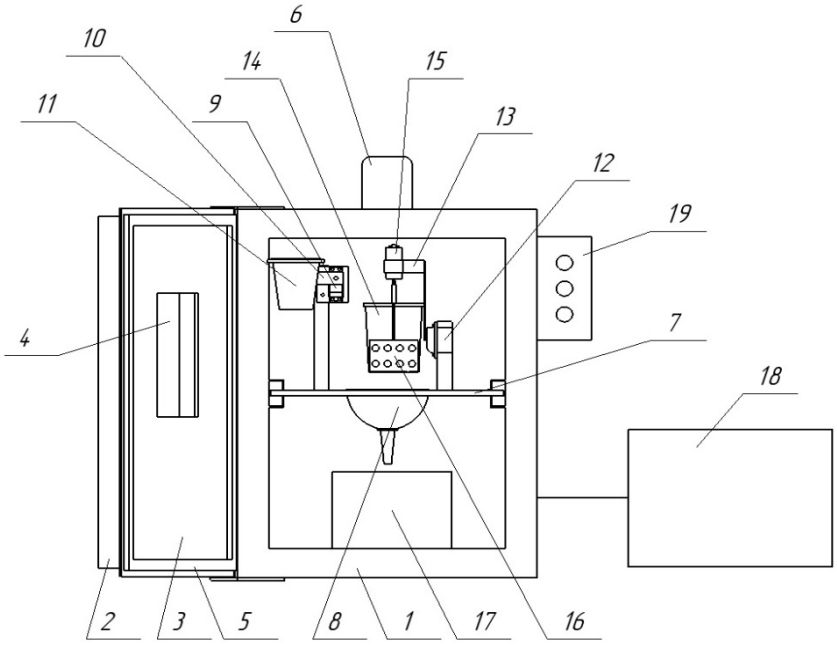


Рис. 1. Схема автоматизированной литьевой установки с нагревающейся литьевой формой

При включении камеры включается компрессор *18*, который создает вакуум в течении времени *t*, в свою очередь, зависящего от производительности вакуумного насоса. После включается сервопривод *12* и выливает содержимое стаканчика *11* в емкость смешивания *14*. Следующим включается электродвигатель *15* и миксером *16* перемешивается смесь в емкости *14* в течение 15–30 с. После содержимое емкости смешивания *14* выливается в воронку *8*, затем смесь поступает в нагревающуюся литьевую форму *17*. По окончанию заполнения фор-

мы жидким полимером включается электромагнитный клапан *6* и давление сравнивается с атмосферным.

Разработанный узел смешивания и переливания (рис. 2) состоит из четырех приводов, включаемых согласно разработанному программному обеспечению. В качестве приводов применены серводвигатели, обеспечивающие автоматизированное переливание жидкости из емкости. Третий привод предназначен для перемешивания смеси, вращая мешалку с заданной частотой вращения. Четвертый вертикальный привод реализован на передаче винт-гайка и приводится в движение электродвигателем постоянного тока с понижающим редуктором. Вертикальный привод предназначен для перемещения лопасти мешалки по вертикали (рис. 2), тем самым обеспечивая равномерное перемешивание всех слоев жидкой смеси, не прибегая к увеличению высоты лопастей. Многоприводная структура установки представляет широкие возможности реализации различных алгоритмы размешивания, управляя как вращением двигателя, так перемещением размешивающих лопастей [6], в том числе с возможностью реализации энергоэффективных режимов согласованной работы приводов [7].

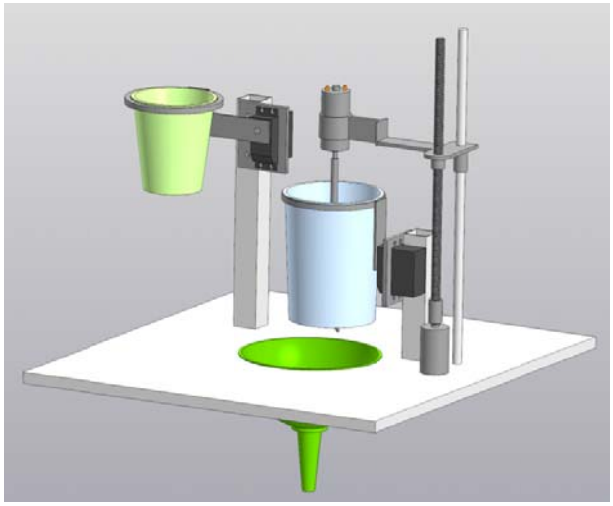


Рис. 2. Узел смешивания с вертикальным перемещением смешивающих лопастей

Преимущества нагреваемой литьевой формы

Разрабатываемые литьевые формы (рис. 3) изготовлены из силикона, который облает низкой способностью к адгезии, благодаря чему отлитая деталь легко извлекается из формы. Помещенные в тело формы нагреватели позволяют увеличивать ее температуру до 100 °С. При внедрении нагревающейся литьевой формы в автоматизированную установку для литья исключается дополнительное оборудование для прогрева отлитых деталей, т. к. литьевые формы уже снабжены нагревателями, контроль температуры, которых осуществляется от общего контроллера управления камерой. Подобное решение позволит увеличить скорость изготовления полимерных изделий, а также уменьшить как количество, так и стоимость оборудования [6, 9].

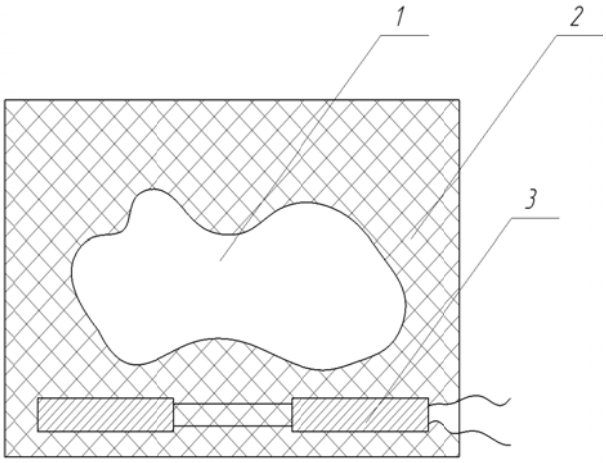


Рис. 3. Эскиз формы с нагревательными элементами: *1* – полость отливаемой детали; *2* – силиконовая форма; *3* – нагревательные элементы

Влияние температуры на скорость полимеризации

Скорость полимеризации в зависимости от температуры иллюстрирует приведенный ниже график (рис. 4), показывающий время набора прочности полиуретанового компаунда АДВ-14 при 22 °С (соответствует отсутствию нагрева формы), 40 °С («средний» нагрев), 80 °С.

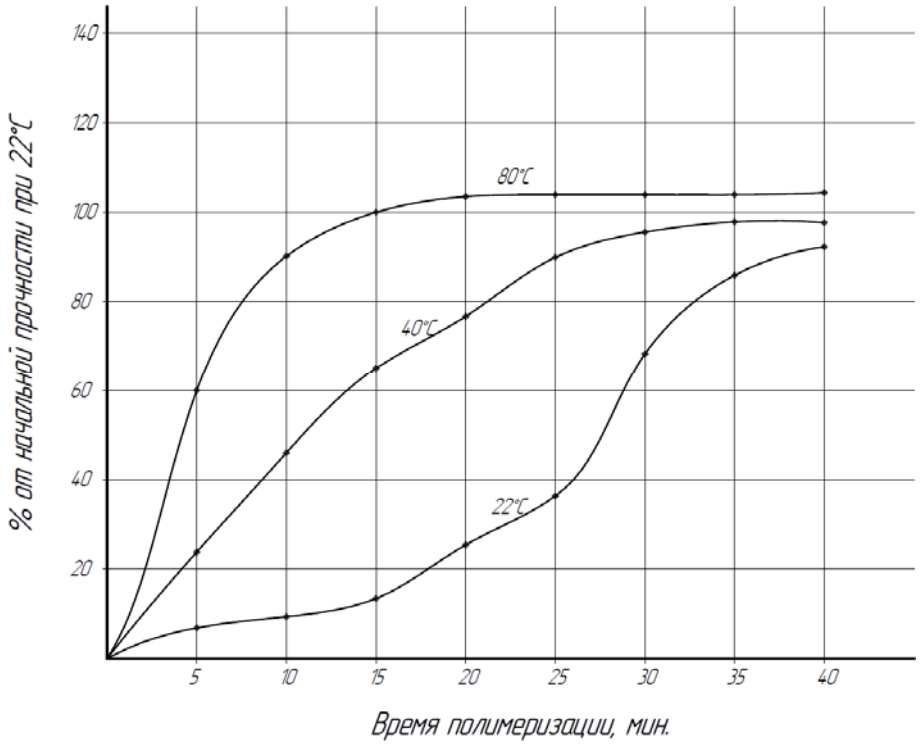


Рис. 4. Зависимость набора прочностных свойств полиуретанового компаунда АДВ-14 от времени при различных температурах нагрева

Выявлено ускорение полимеризации и набора прочностных свойств с ростом температуры, значит для ускорения изготовления отливаемого изделия необходим нагрев. Для повышения производительности технологического процесса целесообразно производить нагрев отлитой детали внутренним нагревом самой формы, что не только повысит производительность процесса, но и избавит от необходимости дополнительного оборудования. Наличие нагревательных элементов в корпусе литьевой формы является более энергоэффективным. Электропотребление такого способа значительно ниже чем у печей, которые сначала нагревают воздух, а потом уже форму и ее содержимое.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Исследование влияния термостатирования рабочей области на механические свойства изделий, получаемых методом послойного наплавления / М. Ю. Козенко, А. М. Макаров, Е. А. Дьяченко, О. И. Сушкова // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 3 (238) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2020. – (Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении»). – С. 73–76.

2. *Назаров, Г. И.* Теплостойкие пластмассы. Справочник / Г. И. Назаров, В. В. Сушкин. – М., Машиностроение, 1980.

3. *Басов, Н. И.* Литьевое формование полимеров / Н. И. Басов, Ю. В. Казанков. – М., Химия, 1984.

4. *Филатов, В. И.* Технологическая подготовка процессов формования изделий из пластмасс / В. И. Филатов, В. Д. Корсаков. – Л., Политехника, 1991.

5. *Прокудин, Г. Ю.* Разработка автоматизированной установки для литья реактопластов / Г. Ю. Прокудин // Конкурс научно-исследовательских работ студентов Волгоградского государственного технического университета : тез. докл. ВолгГТУ. – Волгоград, 2020. – С. 23–24.

6. *Прокудин, Г. Ю.* Разработка автоматизированной вакуумной камеры для мелкосерийного литья пластмассовых деталей / Г. Ю. Прокудин, Н. Г. Шаронов // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 8 (243) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2020. – (Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении»). – С. 67–70.

7. *Прокудин, Г. Ю.* Optimal control of orthogonal-rotary movers of walking robot with an excessive number of drives / G.Yu. Prokudin, N.G. Sharonov, E.S. Briskin// 2019 3rd School on Dynamics of Complex Networks and their Application in Intellectual Robotics (DCNAIR) (Innopolis, Russia, 9-11 September, 2019) / University Innopolis. – [Publisher : IEEE], 2019. – P. 152-154. – DOI: 10.1109/DCNAIR.2019.8875513.

8. *Калинчев, Э. Л.* Автоматизированные литьевые машины и системы управления ими / Э. Л. Калинчев, А. И. Кригевер. – М. : НИИМаш, 1980.

УДК 621.373.826
DOI: 10.35211/1990-5297-2021-1-248-80-83

А. А. Яковлев, Н. В. Федорова, С. Г. Поступаева

ПОИСКОВОЕ КОНСТРУИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ЛАЗЕРОВ НА УГЛЕКИСЛОМ ГАЗЕ НА ОСНОВЕ НОВОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ФИЗИЧЕСКОГО ПРИНЦИПА ДЕЙСТВИЯ

Волгоградский государственный технический университет
E-mail: missis.yana-1995@yandex.ru

Рассматривается специализированный метод синтеза концептуальных технических решений преобразователей энергии (ПЭ) на примере технологических лазеров на углекислом газе. В основу метода положена новая информационная модель физического принципа действия (ФПД). Результаты исследований были оформлены в виде руководящего методического материала (РММ), состоящего из четырех частей.

Ключевые слова: новая информационная модель физического принципа действия; синтез концептуальных технических решений; поисковое конструирование; информационные фонды; преобразователи энергии; лазеры на углекислом газе.

A. A. Yakovlev, N. V. Fedorova, S. G. Postupaeva

SEARCH DESIGN OF TECHNOLOGICAL CARBON DIOXIDE LASERS BASED ON A NEW INFORMATION MODEL OF THE PHYSICAL PRINCIPLE OF OPERATION

Volgograd State Technical University

A specialized method for synthesizing conceptual technical solutions for energy converters (EC) is considered using the example of carbon dioxide-based technological lasers. The method is based on a new information model of the physical principle of action (PPA). The results of the research were presented in the form of a guiding methodological material (GMM), consisting of four parts.

Keywords: new information model of the physical principle of action; synthesis of conceptual technical solutions; search design; information funds; energy converters; carbon dioxide lasers.

Уникальные свойства технологических лазеров позволяют активно использовать их в различных отраслях науки и техники. В последние годы потребность использования лазерных технологий в разных отраслях промышленности резко возросла, а соответственно высокие требования предъявляются и к совершенствованию технологии проектирования технологических лазеров. Особенностью научно-технического прогресса является опережение меры сложности создаваемых изделий по сравнению с методами и технологиями их проектирования. Особенно остро эта проблема стоит на начальных, творческих стадиях проектирования, к которым относятся постановка задачи, структурный синтез нового объекта и поиск концептуальных технических решений в рамках заданной структуры, так как именно от успешного решения задач на начальных стадиях проектирования, в значительной степени зависит качество конструкторских разработок. В связи с этим разработка новых подходов и методов, позволяющих повысить эффективность труда конструктора на начальных стадиях, и последующая автоматизация этих стадий в рамках создания систем автоматизированного проектирования на базе уже апробированных методов, является актуальной задачей.

Особенность этой задачи заключается в трудности формализации творческих стадий проектирования, отличающихся неопределенностью в постановке задачи, методе решения и в окончательном результате. Существует ряд общих подходов к постановке этой задачи, однако практическая реализация многих из них для отдельных классов технических систем, в том числе и таких как ПЭ, неочевидна [1–4].

В результате анализа недостатков существующих традиционных методов поискового конструирования был разработан специализированный метод синтеза концептуальных технических решений ПЭ на примере технологических лазеров на углекислом газе [5–6]. В основу метода положена модифицированная модель ФПД, которая представлена в виде ориентированного графа. В предлагаемой модели ФПД вершинами обозначаются места, так называемые характерные точки, где рабочее те-

© Яковлев А. А., Федорова Н. В., Поступаева С. Г., 2021.

ло лазера испытывает взаимодействия, для которых в термодинамике дается единая формула аналитического выражения обобщенной работы

$$dQ = PdE,$$

где P – обобщенная сила или интенсиал; E – обобщенная координата или экстенсор [7].

Взаимодействия рабочего тела лазера представляются на графе ФПД ребрами с обозначением экстенсоров, сопряженными с данными взаимодействиями. В процессе функционирования вещество рабочего тела может перемещаться внутри устройства, что обусловливает необходимость введения ребер второго типа – маршрутных, связывающих характерные точки. Для многих процессов преобразования энергии в технологических лазерах характерна периодичность взаимодействий и перемещения рабочего тела. Граф ФПД в этом случае необходимо дополнять циклограммой для периодических взаимодействий и перемещений рабочего тела.

При разработке модели ФПД определяются характерные точки лазера, последовательность и виды взаимодействий в этих точках, а также очередность прохождения их рабочим телом. Такая модель позволяет точнее отразить особенности физических процессов, которые не могут быть представлены цепочками физических эффектов. Она сосредотачивает внимание проектировщика на конструктивных особенностях технологического лазера, от которых зависит его морфологическая организация.

На основе данной работы был разработан специализированный алгоритм синтеза концептуальных технических решений лазеров на углекислом газе. Результаты исследований были оформлены в виде РММ. Метод состоит из четырех частей. В первой части даны теоретические основы метода, позволяющие конструктору получить представления об основных понятиях, которые легли в основу данной методики. Вторая часть содержит описание проектных процедур специализированного алгоритма для проектирования CO_2-лазеров. В третьей части приведены примеры синтеза концептуальных технических решений газоразрядных и газодинамических лазеров. Важной составляющей специализированного метода является четвертая часть РММ, представляющая собой информационное обеспечение, в котором дается необходимая справочная информация. Эффективность работы с алгоритмом зависит от того, насколько правильно и тщательно составлено информационное обеспечение. Поэтому структура информационных фондов не может быть произвольной и должна строго соответствовать логической структуре алгоритма. В таблице приводится перечень разделов информационного обеспечения, которые разработаны для проектирования технологических CO_2-лазеров.

Перечень разделов информационного обеспечения

Номер фонда	Наименование информационного фонда
Ф1	Информация для разработки технических требований
Ф2	Технологические процессы, реализуемые с помощью технологических лазеров
Ф3	Технические решения лазеров на углекислом газе
Ф4	Описания физических процессов для создания инверсной заселенности в рабочей смеси
Ф5	Межотраслевой фонд эвристических приемов
Ф6	Конструктивные элементы технологических лазеров
Ф7	Методы оценки и выбора вариантов технических решений

При создании информационных фондов использовалась современная научная и техническая литература, патентные фонды [8–9]. Информационные фонды не являются исчерпывающими, а должны содержать необходимую информацию для использования специализированного метода. На рисунке приведена структура специализированного метода. На схеме указаны наименования этапов, порядок их следования, а также количество шагов и наименования информационных фондов для их осуществления.

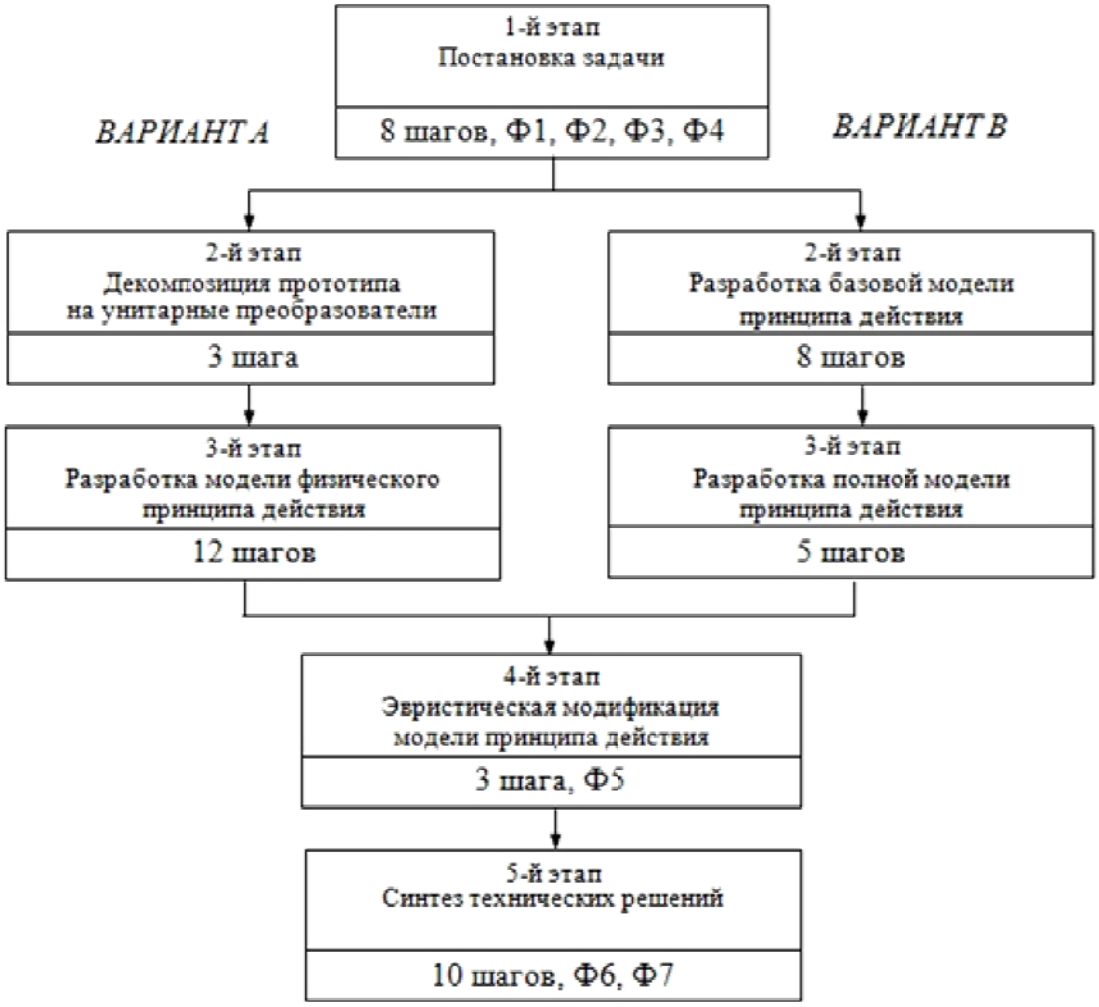


Схема специализированного метода

По результатам первого этапа принимается решение о методе решения задачи. Предлагаются два варианта построения диаграмм ФПД. Вариант *А* предусматривает выполнение шагов в случае, когда имеется некоторое техническое решение, которое является прототипом. Вариант *В* используется для построения модели ФПД на основе описания физического процесса преобразования какого-либо вида энергии в когерентное электромагнитное излучение.

Для синтеза более эффективных принципов действия преобразователей энергии инженерно-физический подход позволяет разработать методику целенаправленной модификации диаграмм с помощью формальных операций над графами, сопоставленными с межотраслевым фондом эвристических приемов.

Выделены элементарные конструктивные функции, позволяющие сопоставить абстрактные элементы диаграмм ФПД с патентными описаниями технических решений и формировать таблицы технических решений, определяющих морфологию проектируемого преобразователя энергии.

Результаты обработки информации по рекомендациям каждого шага алгоритма должны соответствующим образом документироваться в виде текстового описания, списка, графической схемы и т. п.

Алгоритм может использоваться в инженерной практике как для синтеза концептуальных решений лазеров на углекислом газе на стадии технического предложения, так и для быстрого обучения специалистов, которые пока не знакомы со спецификой проектирования лазерной техники. При этом используются информационные фонды, которые в значительной мере повышают эффективность использования алгоритма. Специализированный метод также может служить методическим пособием по подготовке и переподготовке специалистов, занимающихся проектированием самых различ-

ных видов ПЭ. При этом ее необходимо дополнять примерами синтеза технических решений. Также данный метод может служить основой для разработки программных приложений, осуществляющих интеллектуальных поддержку конструктора на начальных этапах проектирования ПЭ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Воинов, Б. С.* Информационные технологии и системы : монография. В 2 кн. Книга I. Методология синтеза новых решений / Б. С. Воинов. – Нижний Новгород : Изд-во ННГУ им. Н. И. Лобачевского, 2001. – 404 с.

2. *Евдошенко, О. И.* Онтологические модели представления знаний для оценки результата синтеза нового технического решения / О. И. Евдошенко, А. Г. Кравец, В.М. Зарипова; И. Ю. Петрова // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 10. – С. 477–483.

3. *Sharma, P. A* literature survey and classification framework of TRIZ methodology [Text] / P. Sharma, R.R. Khanna, V. Bhatnagar // Proceedings of 2nd International Conference on Computational Intelligence and Communication Technology, CICT (Ghaziabad, U.P, India, February, 12-13, 2016) / IEEE - Institute of Electrical and Electronics Engineers. – Ghaziabad (India), 2016. – P. 516-522.

4. *Chen, Y.* A formal functional representation methodology for conceptual design of material-flow processing devices [Text] /Y. Chen, M. Zhao, Y. Liu, Y. Xie // AI EDAM, 2016, Volume 30, Issue 4, pp. 353-366.

5. *Яковлев, А. А.* Разработка множеств технических решений установок для преобразователей энергии : монография / А. А. Яковлев. – М. : Машиностроение -1, 2007. – 128 с.

6. Поисковое конструирование систем охлаждения на основе инженерно-физического подхода / А. А. Яковлев, В. А. Камаев, В. С. Сорокин, С. Н. Мишустина // Информационные технологии. – 2016. – Т. 22, № 11. – С. 819–826.

7. *Вейник, А. И.* Термодинамика реальных процессов / А. И. Вейник. – Минск : Наука и техника, 1991. – 576 с.

8. Федеральный институт промышленной собственности (ФИПС) [Электронный ресурс]: сайт Роспатента. – Режим доступа: https://www1.fips.ru(дата обращения: 10.11.20).

9. Технологические лазеры. Расчет, проектирование и эксплуатация: Справочник в 2 томах. Том 1 / под ред. Г. А. Абильсиитова. – М. : Машиностроение, 1991. – 432 с.

Ответственный за выпуск редактор РИО
Н. Н. Кваша

Компьютерная верстка:
Е. В. Макарова

Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77–61113 от 19 марта 2015 г.
Федеральной службы по надзору в сфере связи, информационных технологий
и массовых коммуникаций (Роскомнадзор)

Адрес редакции и издателя: 400005, г. Волгоград, пр. В. И. Ленина, 28.
Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ)
Телефон: гл. редактор – (8442) 24-80-00
E-mail: president@vstu.ru

Темплан 2021 г. Поз. № 1ж. Дата выхода в свет 27.01.2021 г. Формат 60 × 84 1/8.
Бумага офсетная. Гарнитура Times. Печать офсетная. Усл. печ. л. 9,77. Уч.-изд. л. 9,78.
Тираж 100 экз. Свободная цена. Заказ № 50.

Оригинал-макет и электронная версия подготовлены РИО издательства ВолгГТУ
400005, г. Волгоград, пр. В. И. Ленина, 28, корп. 7.

Отпечатано в типографии издательства ВолгГТУ
400005, г. Волгоград, пр. В. И. Ленина, 28, корп. 7.

К СВЕДЕНИЮ АВТОРОВ

В научном журнале «Известия ВолгГТУ» серии «Прогрессивные технологии в машиностроении» публикуются статьи, которые содержат результаты теоретических и экспериментальных исследований и представляют научный и практический интерес для широкого круга специалистов в области прогрессивных технологий в машиностроении.

Вопрос об опубликовании статьи или ее отклонении решает редакционная коллегия журнала, которая утверждается ректором университета, ее решение является окончательным. Редколлегия направляет представленный для издания материал на рецензирование.

К публикации допускается не более двух статей автора в выпуске.

Рукопись должна быть набрана и сверстана в текстовом редакторе Word 2003–2010 и распечатана на лазерном принтере в режиме полной загрузки тонера. Формат бумаги А4 (210×297 мм).

Для ускорения подготовки издания необходимо представлять файлы статей в электронном виде в полном соответствии с распечатанным оригиналом.

При наборе текста следует соблюдать следующие требования: поля – верхнее – 2,0 см, нижнее – 3,0 см, левое – 2,5 см, правое – 2,5 см; шрифт Times, кегль 14, интервал полуторный.

Текст набирается с применением автоматического переноса слов, перед знаками препинания (в том числе внутри скобок) пробелы не допускаются, после них ставится один пробел. Разрядка слов не допускается, следует избегать перегрузки статей большим количеством формул, рисунков, таблиц. Для набора символов в формульном редакторе MS Equation (MS Word) использовать установки (Стиль/Размеры) только по умолчанию; рисунки должны быть выполнены в редакторах векторной графики, таких как CorelDRAW или в любом приложении к Word. Допускается сканирование рисунков в программе Microsoft Photo Editor.

Инициалы и фамилия автора (авторов) пишутся над заглавием статьи. Ниже заглавия, перед основным текстом, указывается организация или предприятие, в котором работает автор статьи, адрес электронной почты, а также аннотация и ключевые слова на русском языке. Затем на английском языке повторяются инициалы и фамилия автора (авторов), заглавие статьи, организация или предприятие, в котором работает автор статьи, аннотация и ключевые слова. В конце статьи ставится дата и подпись автора (всех авторов).

Литературные ссылки должны быть оформлены в соответствии с ГОСТ 7.1–2003 «Библиографическая запись. Библиографическое описание. Общие требования и правила составления». Библиографический список использованной литературы, составленный в порядке упоминания в тексте, дается в конце статьи; связь с основным текстом осуществляется цифровым порядковым номером в квадратных скобках в строке. Подстрочные ссылки не допускаются.

Иностранные фамилии и термины в тексте следует приводить в русском переводе. В библиографическом списке фамилии авторов, полное название книг и журналов приводятся на языке оригинала.

Ссылки на неопубликованные работы не допускаются. При обозначении единиц физических величин должна применяться Международная система единиц (СИ).

Объем статьи не должен превышать семь страниц бумаги формата А4, включая таблицы и библиографический список; число рисунков – не более четырех, включая рисунки, помеченные буквами *а, б,* и т. д. Рекомендуется включать в журнал статьи с авторским коллективом не более четырех человек с участием каждого автора в одной-двух статьях.

Статьи должны представлять сжатое четкое изложение результатов, полученных автором, без повторов приводимых данных в тексте статьи, таблицах и рисунках. К статье должны быть приложены сведения об авторах (полное имя, отчество, фамилия, ученая степень, звание, домашний адрес, номер телефона служебный, домашний, E-mail), рецензия доктора наук, компетентного в предметной области предоставляемой статьи. Для сотрудников Волгоградского государственного технического университета и подразделений также необходима документация, подтверждающая возможность открытого опубликования (экспертное заключение о возможности опубликования статьи, акт идентификации статьи). Для сторонних авторов также должно быть приложено сопроводительное письмо на имя ответственного секретаря серии с просьбой о публикации.