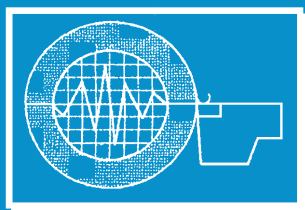


ИЗВЕСТИЯ

Волгоградского
государственного
технического
университета

ISSN 1990-5297



Серия
Прогрессивные технологии
в машиностроении

16+

№ 3 (298)
2025

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

Редакционная коллегия:

Байбурин В. Б., д-р физ.-мат. наук, проф., академик РАЕН, засл. деятель науки РФ, Саратовский государственный технический университет (г. Саратов, Россия)
Безъязычный В. Ф., д-р техн. наук, проф., Рыбинский государственный авиационный технический университет им. П. А. Соловьева (г. Рыбинск, Россия)
Бодров В. Н., д-р, проф., Университет прикладных наук (г. Берлин, Германия)
Бребельс А., PhD, доцент факультета инженерных наук университета г. Левена (г. Левен, Бельгия)
Буренин А. А., чл.-корр. РАН, Институт машиноведения и металлургии ДВО РАН (г. Комсомольск-на-Амуре, Россия)
Голованчиков А. Б., д-р. техн. наук, проф. ВолгГТУ
Гринберг Б. А., д-р физ.-мат. наук, Институт физики металлов УрО РАН (г. Екатеринбург, Россия)
Гуревич Л. М., д-р техн. наук, доц. ВолгГТУ
Добрушин Л. Д., д-р техн. наук, Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины (г. Киев, Украина)
Злотин С. Г., д-р хим. наук, проф., Институт органической химии им. Н. Д. Зелинского РАН (г. Москва, Россия)
Иванов А. М., д-р техн. наук, проф., Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ, г. Москва, Россия)
Иващенко Н. А., д-р техн. наук, проф., засл. деятель науки РФ, МГТУ им. Н. Э. Баумана (г. Москва, Россия)
Королев А. В., д-р техн. наук, проф., Саратовский государственный технический университет (г. Саратов, Россия)
Кузьмин С. В., д-р техн. наук, проф. ВолгГТУ
Кураев А. А., д-р физ.-мат. наук, проф., Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (БГУИР, г. Минск, Республика Беларусь)
Лысак В. И., академик РАН, засл. деятель науки РФ, д-р техн. наук, проф. ВолгГТУ
Марков В. А., д-р техн. наук, проф., Московский государственный технический университет (МГТУ) им. Н. Э. Баумана (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)
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)
Шарилов В. М., д-р техн. наук, проф., Московский государственный технический университет (МАМИ, г. Москва, Россия)
Шаховская Л. С., д-р экон. 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)

Бржозовский Б. М., д.т.н. проф.
(ИМАШ РАН, г. Москва)

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.

Благовецкая М. М., д.т.н., проф.
проректор (МГУПБ, г. Москва)

Пашков Е. В., д.т.н., проф. советник
ректора (СевГУ, г. Севастополь)

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

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

Тихонова Ж. С., к. т. н.
(ответственный секретарь)
Тел. 8-927-504-27-54

Международный индекс журнала
ISSN 1990-5297.

Журнал распространяется
по подписке.
Индекс журнала по каталогу
«Пресса России» – 80811
https://www.pressa-rf.ru/cat/1/edition/y_e80811/

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

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

№ 3 (298)
Март
2025

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: ianovakov@vstu.ru

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

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

Печатается по решению редакционно-издательского совета
Волгоградского государственного технического университета

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

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

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

Head Editor of the scientific journal "Izvestiya VSTU":

Novakov I. A. – Academician of RAS, Prof., Doctor of Chemistry Advisor in the Rector's Office of VSTU

Editorial board:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Pustovoyt 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)

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

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

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

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

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

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

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

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)
Brzhozovsky B. M., D. Sc.
(IMASH RAN, Moscow)
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., rector's advisor
(SEVSU, Sevastopol)
Popov V.I., D. Sc. (Engineering),
Prof. (MSUAB, Moscow)
Serdobintsev S.P., D. Sc.
(Engineering), Prof.
(KSTU, Kaliningrad)
Tihonova Zh. S. (executive secretary),
Cand.Sc
Tel. 8-927-504-27-54

International index of the journal
ISSN 1990-5297.

The journal is distributed by sub-
scription.
Index of the magazine according to
the united catalog
«Press of Russia» – 80811.
[https://www.pressa-
rf.ru/cat/1/edition/y_e80811/](https://www.pressa-rf.ru/cat/1/edition/y_e80811/)

Tel. Of VSTU editorial office:

8-(8442) 24-84-05
8-(8442) 24-84-08
zavrio@vstu.ru

Scientific journal

Published since January 2004

12 times a year

№ 3 (298)
March
2025

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: ianovakov@vstu.ru

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

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

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

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

АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ

- Абакумова С. Ю. 7
Александров И. В. 38
Алексеев И. С. 38
Барабанов В. Г. 47, 74
Бочкарев Н. С. 71
Волков И. В. 38
Генералов И. А. 41, 57
Голованчиков А. Б. 45
Демченко А. И. 71
Драпак К. А. 78
Дроботов А. В. 41, 55
Дружков С. С. 13
Дьяченко Е. А. 74
Залипаев П. П. 45
Залипаева О. А. 45
Ингеманссон А. Р. 35
Казанкин В. А. 10
Казанкина Е. Н. 10
Кожевников Р. С. 17, 21
Кожевникова А. А. 17, 21
Козловцева Н. В. 51
Козорозов Д. В. 47, 51
Кормилицин С. И. 27, 31
Коробова Н. А. 51
Коряжкин А. А. 13
Крылов Е. Г. 51
Кузнецов А. А. 41, 55
Курилов А. А. 55, 57
Кухтик М. П. 61, 65
Литвинов И. В. 7
Макаров А. М. 38, 68
Макарова Е. А. 17, 21
Макарова О. А. 17, 21
Минаева А. Г. 7
Николаев М. Е. 71
Норченко П. А. 27, 31
Ольштынский С. Н. 7
Перфилов В. А. 71
Порхун А. П. 74
Поступаева С. Г. 45
Пронин А. С. 78
Расторгуев Д. А. 24
Редько А. Д. 68
Редько М. Д. 68
Сайкин С. А. 13
Салех Ф. К. 81
Севастьянов А. А. 24
Солодков В. А. 27, 31
Толстяков Н. А. 35
Торубаров И. С. 51, 81
Фомин В. С. 74, 78
Хамраев А. Ю. 61
Храмов М. С. 65
Шостенко С. В. 85
Якоби Я. Ю. 85
Яковлев А. А. 81

СОДЕРЖАНИЕ

Часть 1. ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ

<i>Абакумова С. Ю., Олыштынский С. Н., Литвинов И. В., Минаева А. Г.</i> Аналитическое исследование силового контакта обкатных инструментов с поверхностями галтелей крупных валов при их упрочняющей обработке.....	7
<i>Казанкин В. А., Казанкина Е. Н.</i> Об использовании методов индентирования для построения диаграммы растяжения.....	10
<i>Коряжкин А. А., Дружков С. С., Сайкин С. А.</i> Разработка прикладной цифровой платформы монолитного твердосплавного металлорежущего инструмента.....	13
<i>Макарова О. А., Кожевникова А. А., Макарова Е. А., Кожевников Р. С.</i> Исследование распределения напряжений в обрабатываемом материале в зоне контакта пилы пакетного резания и обрабатываемого материала.....	17
<i>Макарова О. А., Кожевникова А. А., Макарова Е. А., Кожевников Р. С.</i> Математическая модель образования модифицированного контактного слоя при высокоскоростном резании горячего металлопроката.....	21
<i>Расторгуев Д. А., Севастьянов А. А.</i> Диагностика износа режущего инструмента с помощью бесконтактного электромагнитного и вибрационного методов.....	24
<i>Солодков В. А., Кормилицин С. И., Норченко П. А.</i> Сравнение тепловых характеристик установившегося и прерывистого резания.....	27
<i>Солодков В. А., Кормилицин С. И., Норченко П. А.</i> Методика расчета температурных параметров установившегося и прерывистого резания в одинаковых условиях.....	31
<i>Толстяков Н. А., Ингеманссон А. Р.</i> Обоснование диапазонов варьирования факторов при экспериментальных исследованиях глубокого сверления на многоцелевых станках с ЧПУ.....	35

Часть 2. АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

<i>Александров И. В., Алексеев И. С., Волков И. В., Макаров А. М.</i> Исследование параметров микроклимата автоматизированной установки аэропонного выращивания растений.....	38
<i>Генералов И. А., Дроботов А. В., Кузнецов А. А.</i> Исследование тока, генерируемого бесколлекторным двигателем, на экспериментальной установке.....	41
<i>Голованчиков А. Б., Залипаева О. А., Залипаев П. П., Поступаева С. Г.</i> Регулируемая укладка насадки в массообменной колонне для заданных параметров процесса.....	45

<i>Козорозов Д. В., Барабанов В. Г.</i>	
Анализ влияния конструктивных и технологических параметров ножниц на процесс резки.....	47
<i>Коробова Н. А., Козорозов Д. В., Крылов Е. Г., Козловцева Н. В.</i>	
Разработка базы данных «Показатели СМК предприятия химической промышленности для автоматизированного анализа и обработки».....	51
<i>Кузнецов А. А., Дроботов А. В., Курилов А. А.</i>	
Разработка устройства для предотвращения подтекания пластика в FDM аддитивных установках.....	55
<i>Курилов А. А., Генералов И. А., Торубаров И. С.</i>	
Повышение эффективности пятиосевого 3D-принтера за счет автоматизации процесса калибровки.....	57
<i>Кухтик М. П., Хамраев А. Ю.</i>	
Разработка алгоритма и программы управления работой весового дозатора инертных материалов грубо/точно.....	61
<i>Кухтик М. П., Храмов М. С.</i>	
Разработка алгоритма и программы управления работой двухконтурной сип-мойки.....	65
<i>Макаров А. М., Редько М. Д., Редько А. Д.</i>	
Оптимизация энергоэффективности параллельной работы насосов на основе генетического алгоритма.....	68
<i>Николаев М. Е., Перфилов В. А., Демченко А. И., Бочкарев Н. С.</i>	
Планирование траекторий захвата манипулятора полуавтоматизированного погрузочно-транспортного агрегата по критериям энергоэффективности.....	71
<i>Порхун А. П., Барабанов В. Г., Фомин В. С., Дьяченко Е. А.</i>	
Метод гашения резонансных частот FDM принтера.....	74
<i>Пронин А. С., Драпак К. А., Фомин В. С.</i>	
Анализ алгоритма INPUT SHAPING для улучшения точности перемещения печатающей головки аддитивных установок с встроенным программным обеспечением KLIPPER.....	78
<i>Салех Ф. К., Яковлев А. А., Торубаров И. С.</i>	
Методика и оборудование для испытаний на прочность пластиковых зубчатых колес с армированием.....	81
<i>Якоби Я. Ю., Шостенко С. В.</i>	
Разработка и исследование пневмодатчиков для многокоординатных систем автоматизации сварки тонкостенных конструкций.....	85

ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ

УДК 621.787.4

DOI: 10.35211/1990-5297-2025-3-298-7-10

С. Ю. Абакумова, С. Н. Ольштынский, И. В. Литвинов, А. Г. Минаева

АНАЛИТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СИЛОВОГО КОНТАКТА ОБКАТНЫХ ИНСТРУМЕНТОВ С ПОВЕРХНОСТЯМИ ГАЛТЕЛЕЙ КРУПНЫХ ВАЛОВ ПРИ ИХ УПРОЧНЯЮЩЕЙ ОБРАБОТКЕ

Волгоградский государственный технический университет

E-mail: Lighta_06@mail.ru, for_lead22@mail.ru,
lightwave.go@gmail.com, minaeval2000@mail.ru

Приведены результаты теоретического исследования по технологическому и инструментальному обеспечению упрочняющей обработки галтелей крупных ступенчатых валов путем их обкатки тороидальными роликами. Рассмотрены условия контактного взаимодействия и кинематика движения обкатных инструментов по галтелям разных геометрических форм, представленных фрагментами поверхностей второго порядка, и особенности физических процессов, протекающих в зонах их деформационного упрочнения.

Ключевые слова: упругопластическая контактная деформация, упрочняющая обкатка, вал, галтель

S. Yu. Abakumova, S. N. Olshtynsky, I. V. Litvinov, A. G. Minaeva

ANALYTICAL STUDY OF POWER CONTACT OF ROLLING TOOLS WITH FILLET SURFACES OF LARGE SHAFTS DURING THEIR HARDENING TREATMENT

Volgograd State Technical University

The results of a theoretical study on the technological and instrumental support for hardening treatment of fillets of large stepped shafts by rolling them with toroidal rollers are presented. The article examines the conditions of contact interaction and the kinematics of the movement of rolling tools on fillets of different geometric shapes, represented by fragments of second-order surfaces, and the features of the physical processes occurring in the zones of their strain hardening.

Keywords: elastic-plastic contact deformation, strengthening the rolling, shaft, fillet

Прямые валы, как основные несущие элементы приводов механических передач трансмиссий и ходовых систем машин, находят широкое распространение в машиностроении. Для удобства размещения и надежной фиксации в осевом направлении насаженных на них деталей (зубчатых колес, шкивов, звездочек и пр.), валы часто делают ступенчатыми, что неизбежно вызывает концентрацию напряжений вблизи этих переходных участков, приводящую к снижению сопротивления усталостному разрушению.

Многочисленными исследованиями усталостной прочности крупных валов (диаметром более 50 мм), проводимыми в разное время на предприятиях УЗТМ (завод «Уралмаш») [1]

и в лабораториях ЦНИИТМАШ [2], доказано, что одним из основных факторов, сдерживающих возникновение и развитие усталостных трещин, являются остаточные сжимающие напряжения. Среди технологических методов упрочняющей обработки, позволяющих создавать эти напряжения, наиболее эффективным является поверхностное пластическое деформирование (ППД), в частности, обкатка валов (в том числе и галтелей) роликами или шариками [3, 4]. Однако к настоящему времени не существует единой методики определения рациональных режимов их упрочнения: она разработана только для гладких участков валов [5, 6], в то время как режимы обработки галтелей продолжают назначаться на основании экспериментальных

данных, что ограничивает их практическое применение.

Как известно, надежность и долговечность валов зависит, помимо прочностных характеристик и способов фиксации на них деталей и пр., еще и от геометрической формы поверхностей в местах сопряжений участков валов разных диаметров. У крупных валов эти сопряжения (или галтели) выполняются, как правило, поверхностями второго порядка постоянных или переменных радиусов кривизны в осевом сечении; при этом наиболее опасными зонами являются сечения в местах перепада диаметров и у торцов ступиц посаженных на них деталей [2–4, 7]. Поэтому рассматриваемая задача будет иметь две стороны: физическую и геометрическую.

Физическая сторона задачи. Согласно положениям, выдвинутым и обоснованным в работах [5, 6], наибольшей эффективности от применения обработки ППД, оцениваемой максимальным приращением предела выносливости $\Delta\sigma_{-1}$, можно добиться, если в процессе ППД контролировать интенсивность деформации $\varepsilon_{i,0}$ поверхностного слоя, которая в оптимальном варианте должна быть близкой по значению к предельной равномерной деформации ε_p материала упрочняемой детали. Предельное значение этой деформации определяют либо по результатам испытаний на растяжение стандартных образцов, либо находят по приближенной зависимости [2]:

$$\varepsilon_p = 0,6 \cdot \Delta\varepsilon \cdot E / HД \approx 245 / HД, \quad (1)$$

в которой $HД$ – пластическая твердость (ГОСТ 18835–73), $\Delta\varepsilon = 0,002$ – стандартный допуск на остаточную деформацию и $E = 2,05 \cdot 10^5$ МПа – модуль нормальной упругости материала вала.

Задача состоит в назначении технологических режимов обработки, обеспечивающих при заданной глубине z_s наклепа получение на поверхности требуемой интенсивности деформации, т.е. $\varepsilon_{i,n} \approx \varepsilon_p$. Ее значение, зависящее от силы обкатки F , материала и размеров вала, формы и геометрических размеров обкатного инструмента, находится по известной зависимости [6]

$$\varepsilon_{i,n} \approx \varepsilon_{i,0} = k_\beta \cdot \ln(\varepsilon_{i,0} / \Delta\varepsilon) \cdot h / z_s, \quad (2)$$

где k_β – коэффициент, учитывающий объемный характер контактной деформации под обкатным инструментом, h – глубина начального

следа обкатного инструмента на поверхности вала, определяемая по формуле

$$h = \frac{F - F_s}{\pi D_{np} HД}. \quad (3)$$

Здесь важным параметром является приведенный диаметр D_{np} контактирующих тел, зависящий только от их формы и размеров. В его определении применительно к технологическому процессу упрочняющей обкатки галтелей и заключается геометрическая сторона поставленной задачи. Значение D_{np} находят по формуле

$$D_{np} = (A \cdot B)^{-0,5}, \quad (4)$$

где A и B – наименьшая и наибольшая по значениям главные кривизны сопряженных поверхностей тел в контакте, определяемые выражениями

$$A = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{R_{11}} \pm \frac{1}{R_{12}} \right) \text{ и } B = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{R_{21}} \pm \frac{1}{R_{22}} \right); \quad (5)$$

здесь R_{ij} – главные радиусы кривизн поверхностей (индексы j); знаки «плюс» или «минус» берутся в случаях, когда сечение одного из тел в рассматриваемой плоскости (индексы i) ограничено выпуклым или вогнутым контурами.

Рассмотрим случай обкатки галтели вала (размеры ступеней D и d), образованной поверхностью эллипсоидного тора с большой a_z и малой b_z полуосями сечения, тороидальным роликом с диаметром D_p в плоскости обкатки и радиусом r профиля. Схема обкатки показана на рисунке.

В обычной декартовой системе координат (ось Ox направлена вдоль оси вала в сторону большей его ступени) уравнение контура галтели будет

$$x^2/a_z^2 + y^2/b_z^2 = 1. \quad (6)$$

В процессе качения тороидального ролика по поверхности вала диаметром d и его одновременном перемещении вдоль оси Ox с подачей S до точки C_2 значения главных кривизн A и B в поперечном (радиальном) и осевом сечениях по отношению к валу будут неизменными и определяться формулами

$$A = d^{-1} + D_p^{-1} \text{ и } B = (2r)^{-1}, \quad (7)$$

а при входе ролика на галтель они начнут изменяться в зависимости от угла α , определяемого положением нормали $n-n$ к контактирующим поверхностям относительно оси Oy .

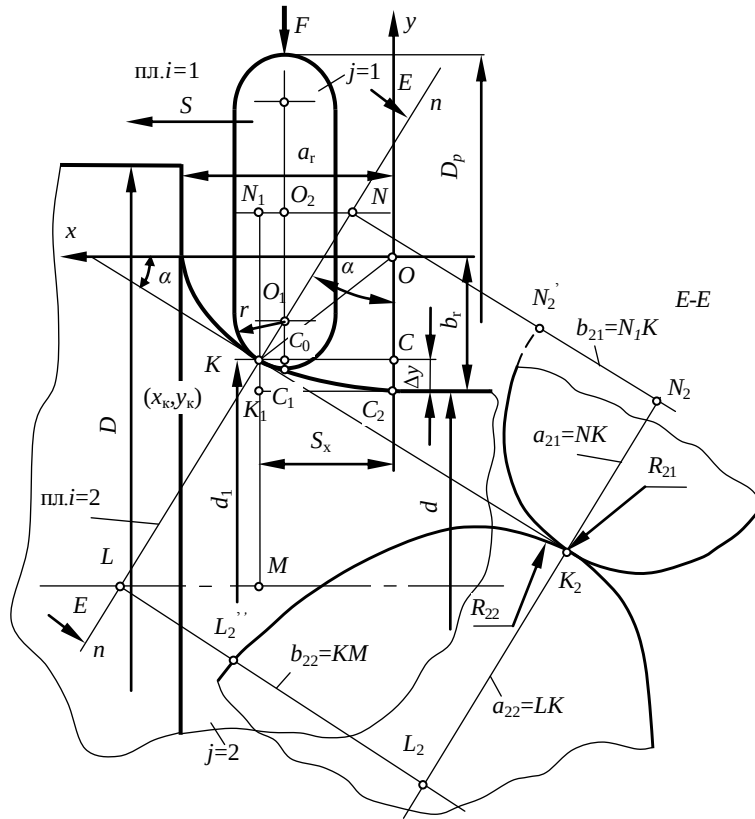


Схема обкатки торoidalным роликом эллипсоидной поверхности галтели ступенчатого вала с осевой подачей инструмента

В некотором промежуточном положении ролика на галтели (контакт в точке K с координатами x_K и y_K) сечения тел в одной из двух взаимно перпендикулярных плоскостей, проходя-

щих через эту точку (плоскость $i = 2$, сечение $E-E$ по нормали), будут ограничены овалами, близкими по форме к эллипсам с полуосями: малыми b_{21} , b_{22} и большими a_{21} , a_{22} :

$$b_{21} = KN_1 = O_2C_1 - C_0C_1 = D_p/2 - r(1 - \cos\alpha), \quad a_{21} = KN_1/\cos\alpha = b_{21}/\cos\alpha; \quad (8)$$

$$b_{22} = KM = K_1M + CC_2 = d/2 + b_e - |y_K|, \quad a_{22} = KM/\cos\alpha = b_{22}/\cos\alpha. \quad (9)$$

Главные радиусы кривизны R_{21} и R_{22} поверхностей тел в этой плоскости определяются

по формулам геометрии [8] как для эллипсов у их больших осей:

$$R_{21} = b_{21}^2/a_{21} = b_{21} \cdot \cos\alpha = (D_p/2 - r(1 - \cos\alpha)) \cos\alpha, \quad (10)$$

$$R_{22} = b_{22}^2/a_{22} = b_{22} \cdot \cos\alpha = (d/2 + b_e - |y_K|) \cos\alpha. \quad (11)$$

В другой плоскости ($i = 1$) аналогичные радиусы кривизны R_{11} у ролика и R_{12} у галтели вала в точке $K(x_K, y_K)$ согласно [8] будут:

$$R_{11} = r \text{ и } R_{12} = a_e^2 b_e^2 \left(\frac{x_K^2}{a_e^2} + \frac{1}{b_e^2} \left(1 - \frac{x_K^2}{a_e^2} \right) \right)^{1.5}. \quad (12)$$

Угол α , зависящий от размеров галтели a_e и b_e и осевого перемещения ролика (координата x_K), определяют по формуле

$$\alpha = \arctan \left(\frac{b_e}{a_e} \cdot \frac{x_K}{\sqrt{a_e^2 - x_K^2}} \right) \cdot \frac{180^\circ}{\pi}. \quad (13)$$

Далее, по зависимостям (5) находятся значения главных кривизн A и B тел, по формуле (4) приведенный диаметр D_{np} , а совместным решением уравнений (1–3) при заданной глубине наклепа z_s – необходимая сила обкатки.

Если галтель образована традиционным кру-

говым тором с радиусом сечения R_c , то следует принять $a_c = b_c = R_c$ и далее определить D_{np} .

Теперь оценим возможное предельное осевое перемещение S_x ролика. С учетом того, что: 1) наиболее уязвимым с позиций усталостной прочности вала является сечение у начала галтели с наибольшей вероятностью зарождения в нем микротрещин [2, 3, 7], 2) «статическая» прочность вала на изгиб возрастает с увеличением его диаметра пропорционально росту момента сопротивления сечения $W_x = 0,1d^3$ и 3) повышение пределов выносливости валов при ППД может в среднем достигать до 30 % и более [1–6] можно определить место на галтели (координату $x_k = x_{np} = S_x$ осевого перемещения ролика до сечения вала с диаметром d_1) и приращение $\Delta u = \Delta u_{np}$ диаметра d , что обеспечит аналогичное увеличению изгибной прочности вала. Согласно расчетам Δu_{np} составляет не более $0,05d$, и именно на эту величину будет происходить «отжатие» ролика от галтели при ее обкатке. Поэтому упрочняющую обработку вала следует проводить до этого места на галтели, контролируя при этом либо предельный

угол α_{np} , полагая в формуле (13) $x_k = x_{np}$, либо соответствующее ему осевое перемещение S_x ролика.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Браславский, В. М. Технология обкатки крупных деталей роликами / В. М. Браславский. – 2-е изд. – М. : Машиностроение, 1975. – 321 с.
2. Исследования по упрочнению деталей машин / под ред. И. В. Кудрявцева. – М. : Машиностроение, 1972. – 328 с.
3. Серенсен, С. В. Несущая способность и расчеты деталей машин на прочность / С. В. Серенсен, В. П. Когаев, Р. М. Шнейдерович. – М. : Машиностроение, 1975. – 488 с.
4. Школьник, Л. М. Полые оси и валы / Л. М. Школьник, Ю. Е. Коваленко, Н. И. Мартынов, Л. А. Усова. – М. : Машиностроение, 1968. – 183 с.
5. Дрозд, М. С. Инженерные расчеты упругопластической контактной деформации / М. С. Дрозд, М. М. Матлин, Ю. И. Сидякин. – М. : Машиностроение, 1986. – 224 с.
6. Сидякин, Ю. И. Повышение эффективности упрочняющей механической обработки валов обкаткой их роликами или шариками / Ю. И. Сидякин // Вестник машиностроения. – 2001. – № 2. – С. 43–49.
7. Лейкин, А. С. Концентрация напряжений в галтелях ступенчатых осесимметричных валов при изгибе и кручении / А. С. Лейкин // Проблемы прочности в машиностроении, вып. 4 / АН СССР, 1959.
8. Бронштейн, И. Н. Справочник по математике / И. Н. Бронштейн, К. А. Семендяев. – М. : Наука, 1967. – 608 с.

УДК 621.81

DOI: 10.35211/1990-5297-2025-3-298-10-13

В. А. Казанкин, Е. Н. Казанкина

ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ МЕТОДОВ ИНДЕНТИРОВАНИЯ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ ДИАГРАММЫ РАСТЯЖЕНИЯ

Волгоградский государственный технический университет

E-mail: kazankin_vmr@mail.ru, kazankina_elena@mail.ru

Приведено обобщение работ авторов, а также основателей научной школы кафедры, посвященных разработке методик неразрушающего определения механических свойств материалов. Приведенные методики позволяют без разрушения детали построить диаграмму растяжения в координатах истинные напряжения – относительное сужение.

Ключевые слова: сферический индентор, неразрушающий контроль, пластическая твердость, диаграмма растяжения, истинные напряжения, относительное сужение

V. A. Kazankin, E. N. Kazankina

ON THE USE OF INDENTATION METHODS FOR CONSTRUCTING A TENSION DIAGRAM

Volgograd State Technical University

The paper provides a summary of the works of the authors, as well as the founders of the scientific school of the department, devoted to the development of methods for non-destructive determination of the mechanical properties of materials. The presented methods allow, without destroying the part, to construct a tension diagram in the coordinates of true stresses - relative contraction.

Keywords: spherical indenter, non-destructive testing, plastic hardness, tension diagram, true stresses, relative contraction

Стандартными методами определения механических свойств испытаний является испытание образцов на растяжение [1]. Для проведения таких испытаний необходимо специальное оборудование, например, программно-технический комплекс для испытания металлов ИР 5143-200, имеющийся на кафедре «Динамика и прочность машин». Кроме того стандартные испытания проводятся на стандартных образцах, изготовленных из материала детали, что исключает возможность проведения стопроцентного контроля деталей, а для некоторых особо ответственных деталей вообще не могут быть проведены. В таких случаях следует использовать неразрушающие методы контроля, в том числе методы индентирования.

Одними из наиболее известных авторов в этой области являются М. П. Марковец, А. Ю. Ишлинский, В. М. Матюнин, М. С. Дрозд, В. К. Григорович, Ю. И. Славский, Д. Тейбор, К. Л. Джонсон.

Особенностью научной школы, созданной М. С. Дроздом, является использование при исследованиях контактного модуля упрочнения материала – пластической твердости [2]. Преимуществом пластической твердости является постоянство ее значения и отсутствие зависи-

мости значений пластической твердости от условий испытаний.

Важной задачей неразрушающего контроля является задача построения диаграммы растяжения по параметрам упругопластического внедрения индентора. Это позволяет значительно сократить затраты на проведение испытаний по определению механических свойств материалов, а также определять эти свойства на готовых деталях.

В 90-е годы XX века была поставлена задача определения характерных точек на диаграмме растяжения, построенной в координатах истинные напряжения – относительное сужение. Эта задача с различными перерывами решалась коллективом кафедры на протяжении тридцати лет. Следует отметить, что истинные напряжения, учитывающие действительную площадь сечения при растяжении, имеют больший физический смысл, хотя и используются при проектировании реже условных напряжений. В то же время, при значительных деформациях и расчета работоспособности деталей наибольшую значимость имеют именно истинные напряжения.

На рисунке 1 показана схема диаграммы растяжения для истинных напряжений.

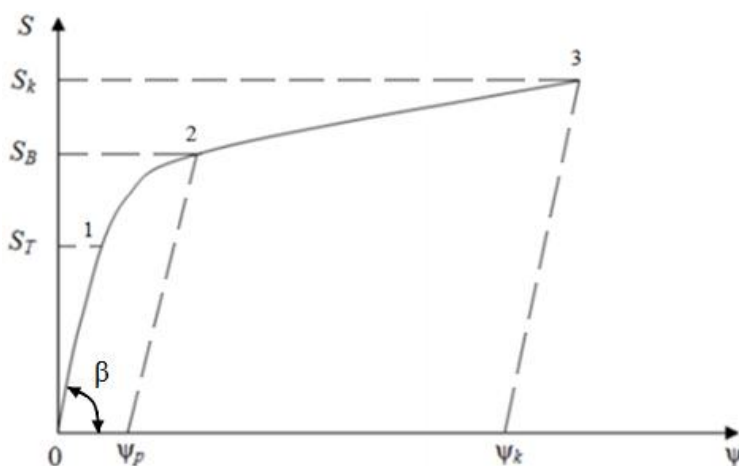


Рис. 1. Схематизированная диаграмма истинных напряжений при растяжении

Первый участок диаграммы характеризуется модулем упругости материала, который равен тангенсу угла наклона линии. Методика определения модуля упругости неразрушающим методом описана в работах [3, 4]. Следует отметить, что указанная методика определения модуля упругости подразумевает использование именно упругопластического внедрения индентора. Для определения модуля упругости

используют формулу Г. Герца для определения упругого сближения, в которую внесена поправка на упругопластический контакт. Анализ публикаций М. С. Дрозда и М. М. Матлина, в которых используется эта поправка, показывает, что теоретическая основа поправки описана крайне мало, в связи с чем авторы данной работы посчитали необходимым привести вывод поправки.

На рисунке 2 показана схема контакта сферического индентора с упругопластически деформируемым плоским телом. Исходя из геометрических параметров контакта, выразим квадрат радиуса отпечатка как:

$$a^2 = 2R_0h - h^2 \quad (1)$$

$$a^2 = \left(h + \frac{\alpha_y}{2}\right) \left(2R - \left(h + \frac{\alpha_y}{2}\right)\right). \quad (2)$$

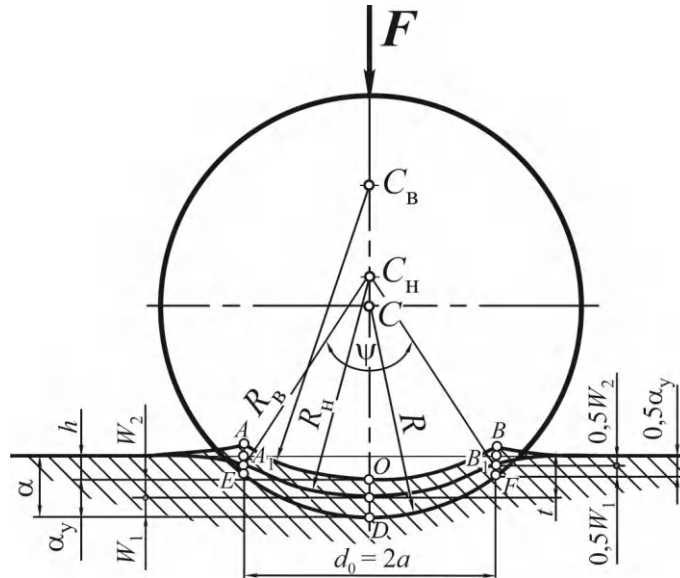


Рис. 2. Схема упругопластического внедрения упругого индентора в плоскую поверхность контртела:

F – контактная нагрузка; R, R_B, R_H – радиус индентора и радиусы кривизны поверхности вмятины под нагрузкой и после разгрузки; h – глубина остаточного отпечатка (остаточное сближение); W_1 и W_2 – упругое смятие сферы под нагрузкой и упругое восстановление полупространства в центре контакта после разгрузки; t – полная глубина отпечатка под нагрузкой; α_y – упругое сближение контактирующих тел; α – полное сближение в контакте; d_0 – диаметр остаточного отпечатка

Решая совместно уравнения (1) и (2), получим выражение для радиуса кривизны поверхности вмятины после снятия нагрузки

$$R_B = R \left(1 + \frac{\alpha_y}{2h}\right) - \frac{\alpha_y}{2} \left(1 + \frac{\alpha_y}{4h}\right). \quad (3)$$

Следует отметить, что справедливость использования поправки для металлов была неоднократно доказана [5]. Авторами экспериментально была проверена справедливость использования поправки и для неметаллов. Используя экспериментальные данные М. С. Дрозда, М. М. Матлина, Ю. И. Сидякина, а также данные авторов работы для неметаллов, можно

сделать вывод о том, что слагаемое $\frac{\alpha_y}{2} \left(1 + \frac{\alpha_y}{4h}\right)$

обычно составляет менее двух процентов от величины R_B . В связи с этим при определении радиуса кривизны остаточного отпечатка можно пренебречь этой величиной, тогда

$$R_B = R \left(1 + \frac{\alpha_y}{2h}\right) \quad (4)$$

Таким образом, преобразование формулы Г. Герца с поправкой на упругопластическое внедрение индентора позволяет получить зависимость для определения модуля упругости материала [3]:

$$E_2 = \frac{1 - \mu_2^2}{1,34(\alpha - h) \sqrt{R(\alpha + h)} - \frac{1 - \mu_1^2}{E_1}}, \quad (5)$$

где дополнительно E_1 – модуль нормальной упругости материала индентора, $\mu_{1,2}$ – коэффициент Пуассона (индексы 1 или 2 относятся к материалам индентора и испытуемого материала соответственно).

Следующей точкой на диаграмме растяжения является точка S_T , которая фактически соответствует пределу текучести, так как площадь поперечного сечения образца на этой части нагружения меняется незначительно. Определение величины S_T проводят согласно [4]:

$$S_T = \sigma_{0,2} = \frac{0,955(1 - 2\mu_2)F}{d^2 (78u)^{245/HD}}, \quad (6)$$

$$\text{где } u = \left(\frac{d}{2R} - 9,43K_1 \frac{F}{d^2} \right) (1 - \mu_2), \quad (7)$$

$$K_1 = (1 - \mu_1^2) / \pi E_1, \quad (8)$$

где d – диаметр остаточного отпечатка.

Далее на диаграмме необходимо определить истинное временное сопротивление S_B , которое связано с условным временным сопротивлением формулой [4]

$$S_B = \frac{\sigma_B}{1 - \psi}, \quad (9)$$

$$\psi = \frac{\varepsilon}{1 + \varepsilon} \quad (10)$$

где ψ – относительное сужение, ε – допуск на остаточную деформацию относительного удлинения.

Величину условного временного сопротивления можно определить согласно [6]:

$$\sigma_B = \frac{0,955(1 - 2\mu_2)F}{d^2 (0,0017u \times \text{НД})^{245/\text{НД}}}. \quad (11)$$

Последняя точка на диаграмме растяжения соответствует истинному сопротивлению разрыву S_k , которое определяют согласно [7]:

$$S_k = 0,18\text{НД} + 700. \quad (12)$$

При этом пластическую твердость НД определяют путем упругопластического внедрения индентора согласно [2].

Определение абсцисс точек диаграммы растяжения, то есть предельного равномерного относительного сужения ψ_p и относительного сужения после разрыва ψ_k описано в работе [8].

Таким образом, в работе описаны результаты работ авторов и коллектива кафедры по определению характерных точек на диаграмме

растяжения материала путем упругопластического внедрения индентора в испытуемый материал. Использование приведенных методик позволит по результатам однократного внедрения индентора прогнозировать механические свойства материалов, используя при этом только приборы для определения твердости, в том числе портативные. В свою очередь использование портативных твердомеров открывает перспективы к автоматизации определения механических свойств материалов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ГОСТ 1497–84, ИСО 6892–84. Металлы. Методы испытания на растяжение.
2. ГОСТ 18835–73. Металлы. Метод измерения пластической твердости. – Введ. 01.01.74 (ограничение срока действия снято Межгосударственным Советом стандартизации, метрологии и сертификации, протокол № 3-93, ИУС № 5/6, 1993 г.).
3. А.с. 1147951 СССР, МКИ⁴ G01N3/40. Способ определения физико-механических свойств материалов / М. С. Дрозд, М. М. Матлин. – Оpubл. 30.03.85, Бюл. № 12.
4. Матлин, М. М. Методы неразрушающего контроля прочностных свойств деталей машин / М. М. Матлин, А. И. Мозгунова, Е. Н. Казанкина, В. А. Казанкин. – М. : Инновационное машиностроение, 2019. – 247 с.
5. Дрозд, М. С. Инженерные расчеты упругопластической контактной деформации / М. С. Дрозд, М. М. Матлин, Ю. И. Сидякин. – М. : Машиностроение, 1986. – 224 с.
6. Патент 2011182 РФ, МКИ G01N 3/40. Способ определения предела прочности материалов / Ю. И. Славский, М. М. Матлин. – Оpubл. 15.04.94, Бюл. № 7.
7. Казанкин, В. А. Оперативный контроль величины истинного сопротивления разрыву сталей / В. А. Казанкин, Е. Н. Казанкина // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 10 (293) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2024. – (Серия «Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении»). – С. 43–45. – DOI: 10.35211/1990-5297-2024-10-293-43-45.
8. Матлин, М. М. Инженерные решения контактных задач в машиностроении : монография / М. М. Матлин, В. А. Казанкин, Е. Н. Казанкина. – Москва, 2020. – 246 с.

УДК 658.51

DOI: 10.35211/1990-5297-2025-3-298-13-17

А. А. Коряжкин¹, С. С. Дружков¹, С. А. Сайкин²

РАЗРАБОТКА ПРИКЛАДНОЙ ЦИФРОВОЙ ПЛАТФОРМЫ МОНОЛИТНОГО ТВЕРДОСПЛАВНОГО МЕТАЛЛОРЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА

¹ АО «Новые инструментальные решения»

² ПАО «ОДК–Кузнецов»

E-mail: koryazhkin.andrey@zao-nir.com, drugkov.s.s@rambler.ru, saikinsergey@yandex.ru

Определена актуальность создания прикладной цифровой платформы для фирм-производителей и потребителей металлорежущего инструмента. Представлено создание прикладной цифровой платформы на базе предприятия АО «Новые инструментальные решения» применительно к его непосредственному производственно-технологическому циклу.

Ключевые слова: металлорежущий инструмент, жизненный цикл изделия, цифровая платформа

A. A. Koryazhkin¹, S. S. Druzhkov¹, S. A. Saikin²

**DEVELOPMENT OF AN APPLIED DIGITAL PLATFORM
FOR MONOLITHIC CARBIDE METAL CUTTING TOOLS**

¹ JSC «New instrumental solutions»

² PJSC «UEC–Kuznetsov»

The relevance of creating an applied digital platform for manufacturers and consumers of metal-cutting tools is determined. The creation of an applied digital platform based on the enterprise JSC «New Instrumental Solutions» in relation to its direct production and technological cycle is presented.

Keywords: metal cutting tool, product life cycle, digital platform

Расширение использования монокристаллического инструмента во всех отраслях машиностроения приводит к обострению конкуренции между производителями. При этом важнейшим показателем является соотношение «цена/качество», которое определяется затратами на эксплуатацию инструмента при изготовлении единицы продукции. Сложность определения такого показателя обусловлена разнообразием номенклатуры выпускаемого инструмента, которая расширяется за счет многообразия применяемых износостойких покрытий, определяющих работоспособность инструмента. Кроме того, для определения расходов на производство инструмента, требуются данные от эксплуатирующих его предприятий (обрабатываемые материалы, используемые режимы резания). Программное обеспечение, позволяющее покупателю упростить выбор инструмента и назначение режимов его эксплуатации, имеется у некоторых зарубежных производителей, однако недостатком таких систем является отсутствие обратной связи потребителя с производителем инструмента для возможности аналитической оценки результатов его эксплуатации. В связи с этим актуальной задачей является создание прикладной цифровой платформы (единой информационной среды [1]) для фирм-производителей и потребителей металлорежущего инструмента, которая позволит рекомендовать оптимальные условия эксплуатации инструмента, сократить производственные затраты и увеличить конкурентоспособность отечественных производителей на инструментальном рынке.

Представленная разработка посвящена реализации цифровой платформы на базе предприятия АО «Новые инструментальные решения» (АО «НИР») применительно к его непосредственному производственно-технологическому циклу, как производителя монокристаллического металлорежущего инструмента для нужд конкретного заказчика.

Цифровые технологии в настоящее время находят широкое распространение в различных областях промышленности. Они приобрели особую актуальность в сфере машиностроения, как высокотехнологичной и наукоемкой отрасли производства, требующей непрерывного развития, в частности путем применения цифровых технологий [2]. Цифровизация производственных процессов позволяет существенно уменьшить себестоимость продукции не только на стадии изготовления, но также и на этапе ее внедрения на территории заказчика. Одно и то же изделие может с одной стороны восприниматься как отдельный элемент физической природы, а с другой представлять из себя набор значений характеристических параметров, содержащихся в сопроводительной технической документации. Поскольку параметры изделия в основном имеют количественное выражение, находит применение цифровой двойник жизненного цикла изделия [3,4]. Целью данного исследования является разработка прикладной цифровой платформы для отечественных фирм-производителей и потребителей инструмента, при создании цифрового двойника инструмента для определения оптимальных условий его эксплуатации, сокращения затрат на изготовление и увеличения конкурентоспособности продукции на инструментальном рынке. Данная платформа должна позволить производителям выйти на новый уровень изготовления и контроля качества своей продукции, а также в системе обратной связи получать отзывы и рекомендации потребителей об улучшении качества продукции или изменении ее конкретных свойств в соответствии с потребностями заказчика в режиме реального времени.

Пилотный проект по разработке и апробации цифровой платформы металлорежущего инструмента был реализован на базе предприятия АО «НИР» с учетом выявленных недостатков существующих схем работы инструментального хозяйства на предприятиях.

При этом проведен анализ взаимосвязей процессов создания и применения металлорежущего инструмента, а также рассмотрена воз-

можность усовершенствования данной взаимосвязи путем внедрения цифровой платформы (рис. 1).

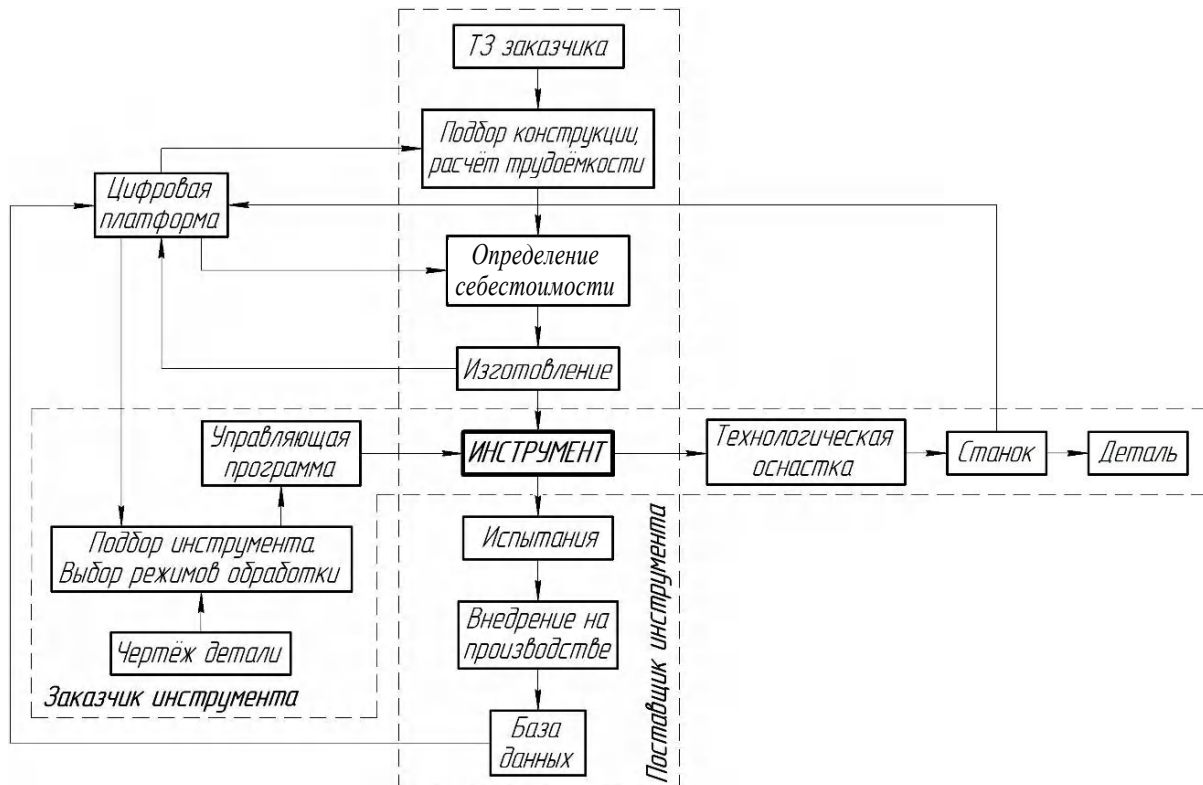


Рис. 1. Интеграция цепей изготовления и эксплуатации металлорежущего инструмента на базе цифровой платформы

Эффективность управления производственной системой определяется возможностью комплексного контроля ее ключевых параметров. Мониторинг производственного процесса на предприятии АО «НИР» осуществляется за счет автоматизированной информационной системы (АИС), выполняющей сбор и отображение данных о работе станочного оборудования с числовым программным управлением (ЧПУ), а также фиксации информации, поступающей с оборудования о режимах обработки и параметрах станка (рис. 2).

В ходе работы решены следующие задачи:

- произведена интеграция информационных потоков путем считывания и передачи в систему предварительно присвоенного цифрового (QR) кода каждого элемента технологического цикла производства (заготовки, технологии, оборудования, ответственных специалистов);
- выполнено обеспечение корректировки

окна вывода данных для отображения графиков изменения рабочих параметров станка с определением соотношения фактических и нормативных значений.

За счет наполнения сводного перечня данных о производимом инструменте дополнительными параметрами стало возможным формирование цифрового двойника металлорежущего инструмента, в результате появления которого, производитель и потребитель инструмента имеют возможность в режиме реального времени получать всю необходимую информацию о ходе производственного процесса (его параметрах) и характеристиках производимого инструмента. Таким образом в ходе создания интегрированной цифровой платформы металлорежущего инструмента было выполнено слияние четырех информационных потоков в единую систему «станок – инструмент – деталь – режимы обработки» (рис. 3).

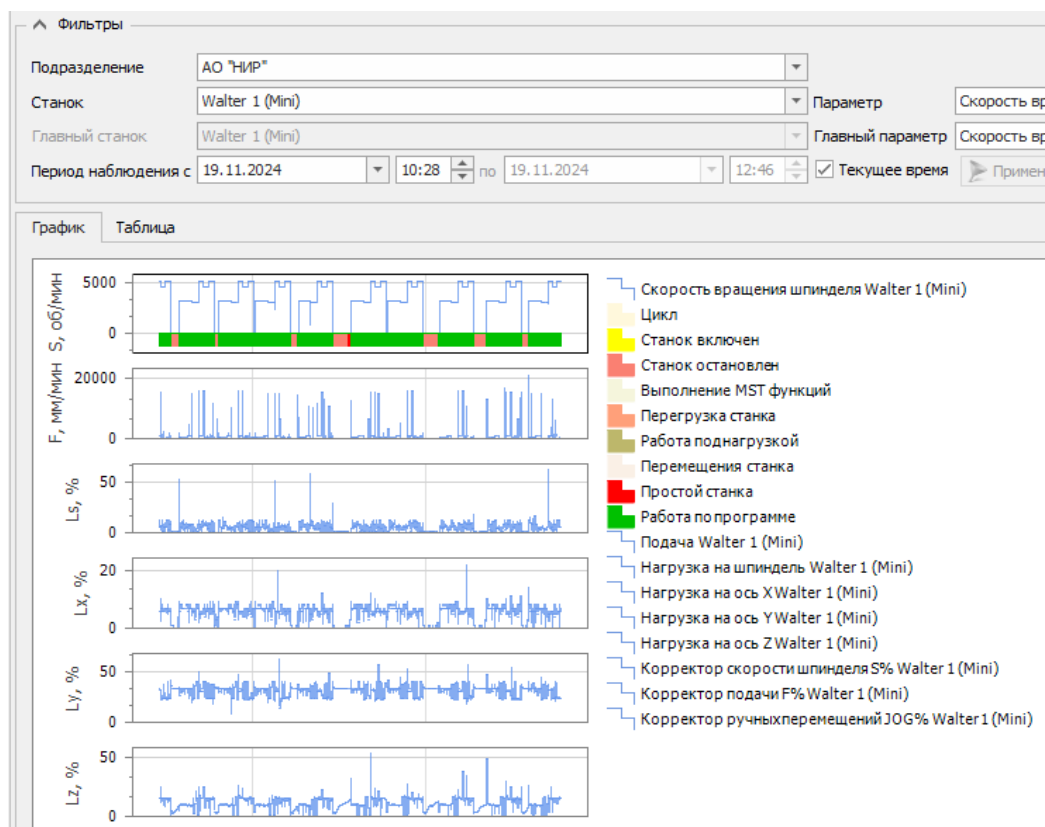


Рис. 2. Контроль значений технологических параметров в АИС

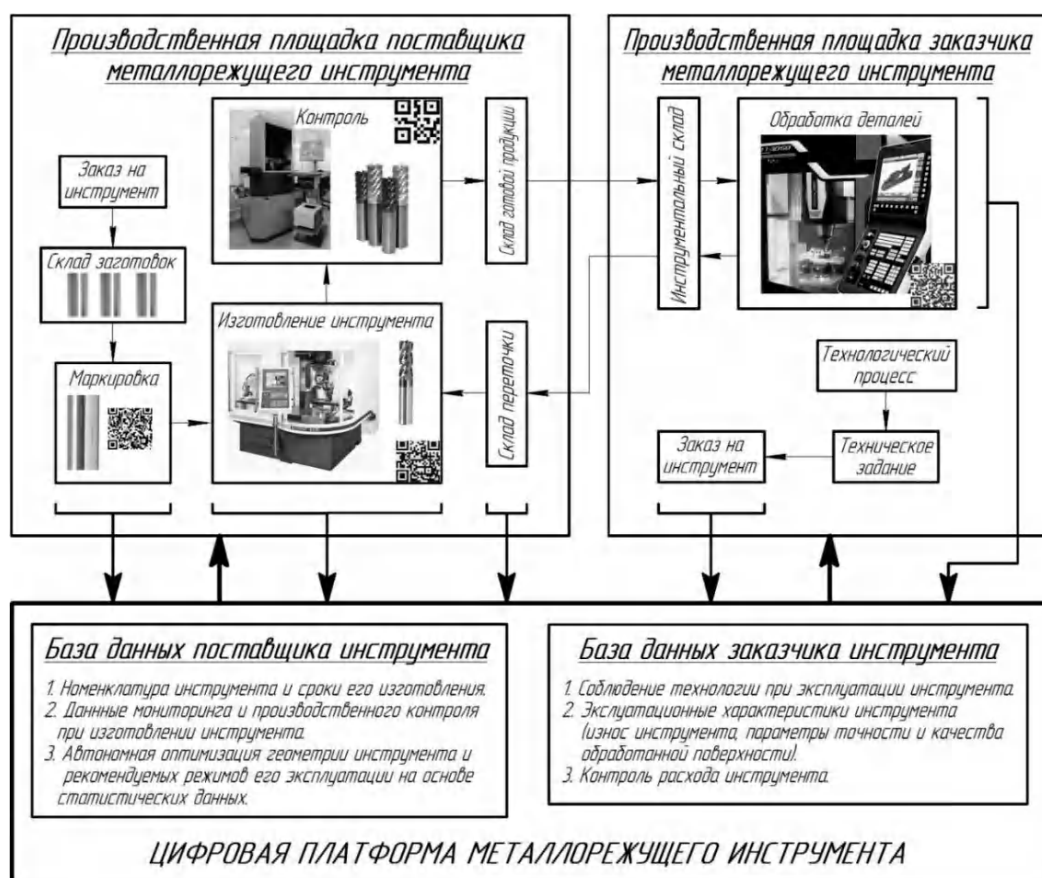


Рис. 3. Модель цифровой платформы металлорезающего инструмента

За счет интеграции данных о металлорежущем инструменте в единую информационную систему был получен его цифровой двойник, с помощью которого становится возможным выполнить анализ жизненного цикла инструмента, аккумулировать статистические данные в виде базы данных испытаний для дальнейшего использования, а также исключить влияние негативных факторов, присущих классическим способам введения инструмента на металлообрабатывающих предприятиях.

Внедрение разработанной цифровой платформы и ее последующая успешная апробация прошла на предприятии АО «НИР» в рамках инновационного проекта интеграции технических задач по производству металлообрабатывающего инструмента и его эксплуатации в реальных условиях на предприятии заказчика. При этом были получены следующие результаты:

- снижена себестоимость выпускаемого инструмента за счет уменьшения трудоемкости аналитических работ путем применения цифровых сервисов;
- достигнут новый качественный уровень производства продукции за счет непрерывного

удаленного мониторинга ключевых элементов производственной цепи изготовления инструмента;

- созданы и выведены на рынок новые образцы изделий;
- расширена сфера реализации продукции путем использования новой бизнес-модели на рынке металлорежущего инструмента;
- увеличены объемы продаж предприятия.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Биктимиров, В. Р. Современные методики управления качеством. Цифровой двойник / В. Р. Биктимиров, А. А. Рашупкина // Современные научные исследования и разработки. – 2018. – № 8 (25). – С. 34–36.
2. Коряжкин, А. А. Проект «Цифровая платформа жизненного цикла инструмента» / А. А. Коряжкин // Управление производством. – 2020. – № 03. – С. 59–70.
3. Коряжкин, А. А. Управление проектами в условиях цифровой трансформации : монография / А. А. Коряжкин, Н. В. Артемьев, М. Ю. Маковецкий, Е. С. Митяков [и др.] // Московский университет им. С. Ю. Витте. – Москва : Изд. ЧОУВО «МУ им. С. Ю. Витте». – 2024. – С. 130–143.
4. Пономарев, К. С. Стратегия цифрового двойника производства как метод цифровой трансформации предприятия / К. С. Пономарев, А. Н. Феофанов, Т. Г. Гришина // Вестник современных технологий. – 2019. – № 4 (16). – С. 23–30.

УДК 621.774.3: 004.942

DOI: 10.35211/1990-5297-2025-3-298-17-21

О. А. Макарова, А. А. Кожевникова, Е. А. Макарова, Р. С. Кожевников
ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЙ
В ОБРАБАТЫВАЕМОМ МАТЕРИАЛЕ В ЗОНЕ КОНТАКТА ПИЛЫ
ПАКЕТНОГО РЕЗАНИЯ И ОБРАБАТЫВАЕМОГО МАТЕРИАЛА

Волгоградский государственный технический университет

E-mail: olgamakarova5024@gmail.com, alla.aka-78@yandex.ru,
m.lipka2015@yandex.ru, yetoi123@bk.ru

В статье рассмотрены результаты компьютерного моделирования напряжений в обрабатываемом материале при термофрикционном резании пакета заготовок. Рассматриваемым инструментом является пильный диск из стали 50ХГФА, материал заготовки сталь 45. Модели были созданы в программном пакете SIMULIA/Abaqus для анализа напряжений на контактирующих поверхностях зубьев и пластины в условиях пластического деформирования.

Ключевые слова: деформация, напряжения, пильный диск, моделирование, метод конечных элементов

О. А. Makarova, A. A. Kozhevnikova, E. A. Makarova, R. S. Kozhevnikov
INVESTIGATION OF STRESS DISTRIBUTION IN THE PROCESSED
MATERIAL IN THE CONTACT AREA OF THE BATCH
CUTTING SAW AND THE PROCESSED MATERIAL

Volgograd State Technical University

The article considers the results of computer simulation of stresses in the processed material during thermofriction cutting of a package of workpieces. The tool in question is a saw blade made of 51CrMnV4 steel, the material of the workpiece is 45 steel. The models were created in the SIMULIA/Abaqus software package for stress analysis on the contacting surfaces of teeth and plates under plastic deformation conditions.

Keywords: deformation, stresses, saw blade, modeling, finite element method

Введение

В ТПЦ – 2 АО «ВТЗ», как и на многих металлургических предприятиях при производстве бесшовных труб широко используется пакетная резка металлопроката дисковыми пилами. В работе исследуется термофрикционное резание холодного трубопроката салазковой пилой. Пильные диски, используемые для резки холодного и горячего металлопроката, изготавливаются из конструкционной стали. Достоинством этого вида обработки является высокая производительность процесса резания и простота технологической операции, а недостатком – повышенный износ пил и значительное ухудшение качества реза [1–3]. При высокоскоростном термофрикционном резании дисковой пилой наблюдается заплывание впадин зубьев пилы и их деформация, что приводит к потере режущих свойств инструмента. Отдельные зубья пилы изношены больше других и имеют значительные поперечные трещины. На торцах труб происходит образование крупных заусенцев прочно прикрепленных к телу заготовки [4–6].

Для повышения стойкости инструмента и уменьшения заусенца при пакетной резке необходимо достоверное описание процессов, протекающих в зоне резания, особенно при резке проката из высоколегированных сталей сопровождающейся повышенным износом пил.

Используемая в производстве ТПЦ – 2 АО «ВТЗ» стационарная салазковая пила холодного резания предназначена для резки труб, поступающих из охладителя. Обрезается головная и хвостовая часть труб, а также производится разрезка труб на заданные размеры.

Привод вращения диска пилы осуществляется от электродвигателя постоянного через зубчатую муфту и конический редуктор. Механизм привода главного движения устанавливается в головной части пилы на неподвижной раме с направляющими (салазками). Продольная подача пилы осуществляется перемещением механизма привода по салазкам под действием гидроцилиндра.

Система управления механизмами главного движения и подачи не предусматривает точное отслеживание усилий резания, что создает большие трудности при проведении экспериментов, которые могут определить напряжения и величину тепловыделения в процессе обработки. Для прогнозирования результатов и снижения затрат на натурный эксперимент необ-

ходимо использование численных методов, таких как метод конечных элементов.

В ранее проведенных исследованиях методами компьютерного моделирования [7, 8] обоснована модернизация геометрии пильных дисков для повышения стойкости инструмента и качества торца горячего проката.

Целью настоящей работы является исследование термофрикционного резания с помощью методов конечных элементов в программном комплексе Abaqus и определение напряжений в зоне контактного взаимодействия зубьев пилы и обрабатываемого материала.

Анализ условий пакетного резания и кинематики оборудования

В прокатных и металлургических цехах салазковые пилы нашли широкое распространение [1, 3]. Стационарная салазковая пила холодного резания предназначена для резки труб, поступающих из охладителя. Обрезается головная и хвостовая часть труб, а также производится разрезка труб на заданные размеры. Транспортировка труб до и после пилы осуществляется рольгангом. Обрезы головной и хвостовой части сбрасываются в короб, установленный на тележке, и затем удаляются краном.

Основные технические характеристики участка резки холодного металлопроката стана 5500 ТПЦ – 2:

- максимальная ширина пакета 800 мм;
- количество труб в пакете 3–15 шт.;
- диаметр труб 42–245 мм;
- толщина труб 4,2–30 мм;
- длина обреза головной части 100–2 500 мм;
- длина обреза хвостовой части 300–2 500 мм;
- длина разрезаемой конечной трубы 5 000–15 000 мм;
- максимальная температура труб 100 °С.

Салазковая пила состоит из механизма привода главного движения, привода подачи салазок и станины. На рис. 1 представлена кинематическая схема установки. Привод механизмов главного движения резания (вращение диска пилы) осуществляются от двигателя постоянного тока мощностью 315 кВт 1485 об/мин через зубчатую муфту и конический редуктор с передаточным отношением 35/45. Механизм привода главного движения устанавливается в головной части пилы на неподвижной раме с направляющими (салазками). Боковое биение исключается за счет жесткости направляющих станины и самих салазок. Охлаждение пильного диска осуществляется водой высокого давления (3–4 МПа).

Основные технические характеристики салазковой пилы пакетной резки холодного металлопроката ТПЦ – 2 (рис. 1):

– число оборотов пилы: $n = 1160$ об/мин;

– скорость резания: $V=113\text{--}122$ м/с;

– ход режущего диска: 1 300 мм;

– максимальная подача S диска пилы: 200 мм/с;

– скорость отвода диска: 300 мм/с.

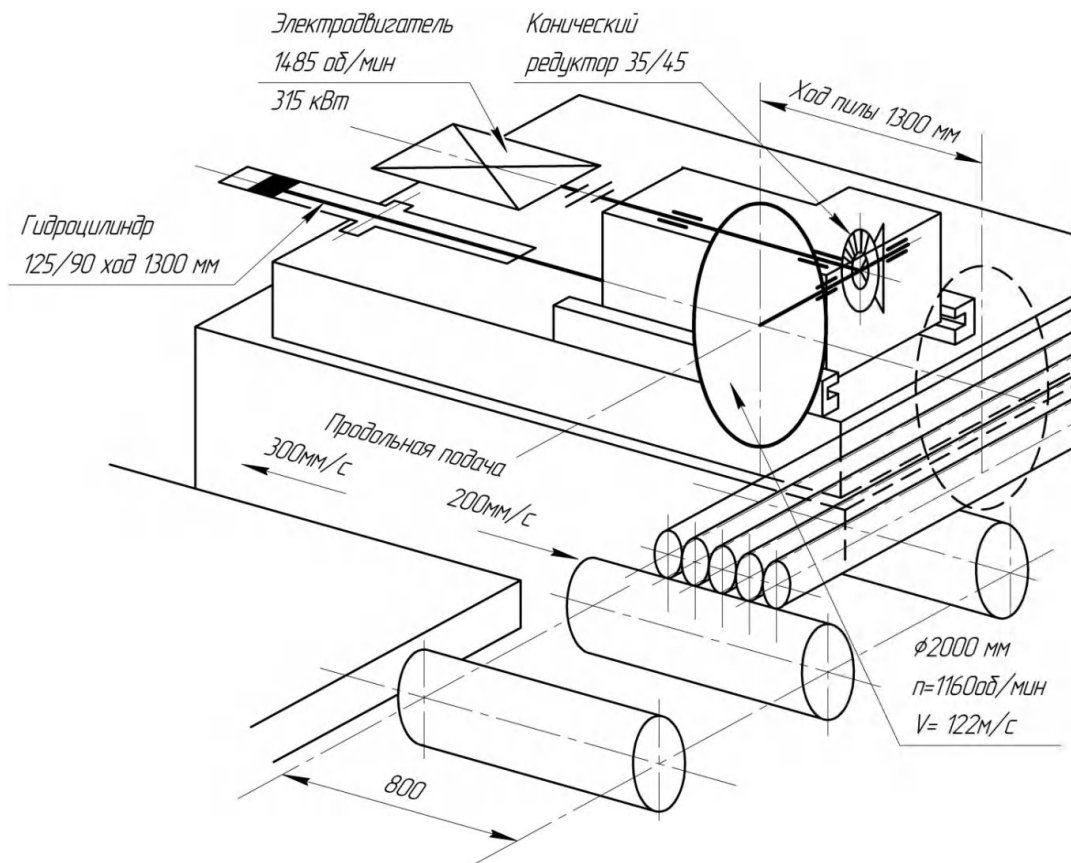


Рис. 1. Кинематическая схема салазковой пилы пакетной резки

Для моделирования процесса термофрикционного резания необходимо определить усилия, с которыми пила прижимается к обрабатываемой поверхности. Для решения этой задачи было проведено компьютерное моделирование процесса резания с использованием пакета программ SIMULIA/ Abaqus.

Материалы и методика проведения исследования

Для расчета напряжений в контактной зоне использовался модуль Abaqus/ Explicit программного комплекса SIMULIA/ Abaqus компании Dassault Systemes), с явной схемой интегрирования для сильно нелинейных переходных быстропротекающих динамических процессов.

Пильный диск из стали 50ХГФА вращается со скоростью 122 м/с и контактирует с разрезаемой заготовкой из стали 45. Подача инструмента равна 0,173 м/с, что соответствует 200 мм/с перемещения механизма привода станка.

Пильный диск моделируется в виде пластины с 100 зубьями. Размер задней поверхности зубьев, находящихся в контакте с обрабатываемым материалом, равен 3,5 мм, расстояние между зубьями пилы 15,7 мм (рис. 2).

Использовался метод полностью связанного анализа термических процессов и механических напряжений (Fully coupled thermal-stress analysis), который может выполняться, когда решения механической и тепловой задач сильно влияют друг на друга и, следовательно, должны быть анализируемы одновременно. Задаваемая схема должна обеспечивать наличие элементов со степенями свободы, как по температуре, так и по перемещению.

Расчет проводился с использованием модели Мизеса. Материалы элементов деформируемой системы задавались изотропными с повышающимися пределами текучести $\sigma_{0,2}$ при росте локальной пластической деформации.

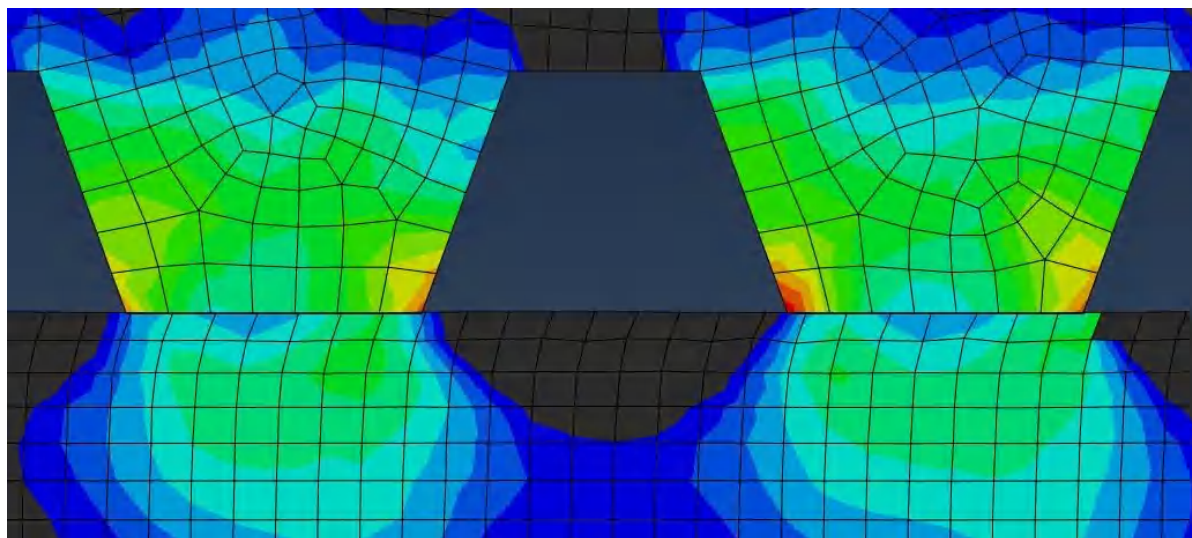


Рис. 2. Распределение напряжений в обрабатываемом материале и инструменте в зоне контакта

Для расчета изменения предела текучести материалов пилы и разрезаемой пластин в результате пластического деформирования при различных температурах и скоростях деформирования использовали модели пла-

стичности Джонсона–Кука [8].

По результатам моделирования получено распределение напряжений в зоне контакта задней поверхности инструмента и обрабатываемого материала (рис. 3).

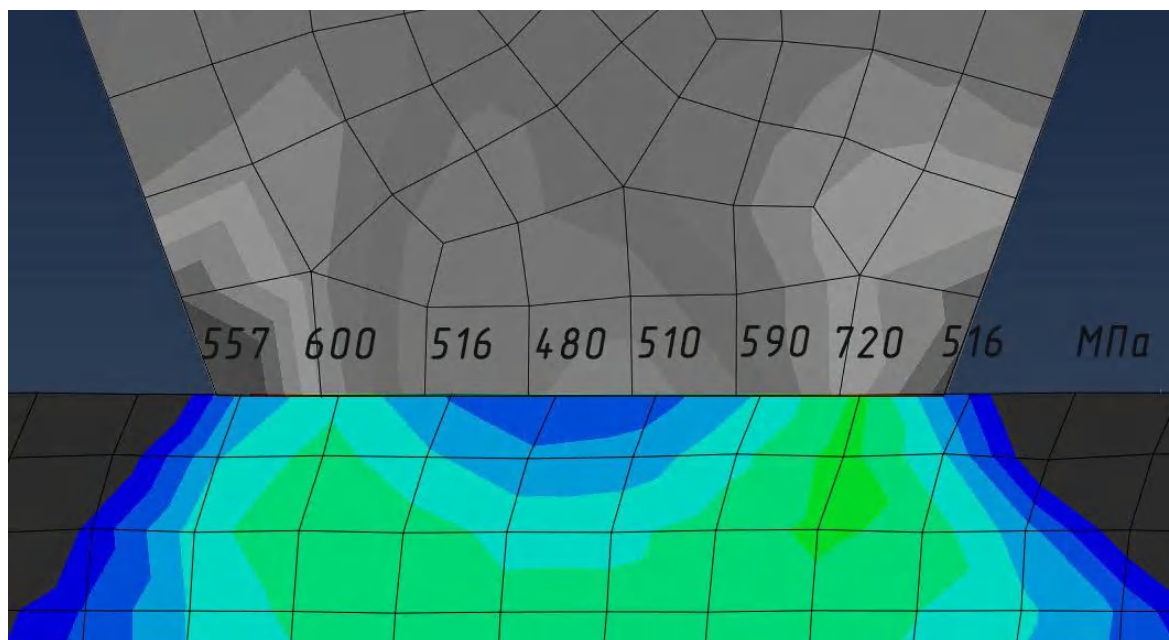


Рис. 3. Распределение напряжений в обрабатываемом материале по длине контакта с зубом пилы

Для определения среднего напряжения в обрабатываемом материале на одном зубе в зоне контакта было проведено интегрирование полученных значений по длине площадки контак-

та (рис. 4). Для 10 зубьев, одновременно находящихся в контакте с обрабатываемым материалом, среднее значение напряжения равно 562 МПа.



Рис. 4. Среднее напряжение в обрабатываемом материале в зоне контакта

Полученные значения позволяют более корректно, с учетом действующих нагрузок, рассчитывать температурные поля при термофрикционном резании при данных кинематических параметрах.

Выводы

Методами конечно-элементного компьютерного моделирования в пакете программ SIMULIA/Abaqus проведен полностью связанный анализ механических напряжений, возникающих при резании с заданными скоростями и перемещениями, что позволяет вести дальнейший анализ температурных полей и пластических деформаций.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шур, И. А. Машины и агрегаты металлургического производства / И. А. Шур, Н. А. Чиченев, С. М. Горбатов. – 2009.

2. Ищенко, А. А. Пилы горячей резки проката. Конструкции и расчет : монография / А. А. Ищенко, Е. А. Лоза ; ГВУЗ «Приазов. госуд. техн. ун-т». – Мариуполь : ГВУЗ «ПГТУ», 2012. – 251 с.

3. Данченко, В. Н. Технология трубного производства : учеб. для вузов / В. Н. Данченко, А. П. Коликов, Б. А. Романцев, С. В. Самусев. – М. : Интермет Инжиниринг, 2002. – 640 с.

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

5. Банников, А. И. 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 с.

6. Макарова, О. А. Исследование микроструктуры заусенцев на торцах заготовок при пакетном резании дисковой фрезой / О. А. Макарова // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 1 (260) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2022. – (Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении»). – С. 23–29.

7. Гуревич, Л. М. Моделирование высокоскоростного резания в Deform 3D / Л. М. Гуревич, Р. Е. Новиков, А. Г. Серов // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 9 (188) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2016. – (Серия «Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении»). – С. 60–64.

8. Исследование термо-деформированного состояния зубьев пилы пакетной резки с использованием МКЭ / Л. М. Гуревич, А. И. Банников, О. А. Макарова, В. Ф. Даненко, С. П. Писарев, А. С. Губарев, Д. В. Шагоян, Н. В. Трутнев, А. В. Красиков // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 2 (261) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2022. – (Серия «Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении»). – С. 40–45.

УДК 621.9.02

DOI: 10.35211/1990-5297-2025-3-298-21-24

О. А. Макарова, А. А. Кожевникова, Е. А. Макарова, Р. С. Кожевников

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОБРАЗОВАНИЯ МОДИФИЦИРОВАННОГО КОНТАКТНОГО СЛОЯ ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОМ РЕЗАНИИ ГОРЯЧЕГО МЕТАЛЛОПРОКАТА

Волгоградский государственный технический университет

E-mail: olgamakarova5024@gmail.com, alla.aka-78@yandex.ru,
m.lipka2015@yandex.ru, yetoi123@bk.ru

В статье выполнен анализ характера образования модифицированного контактного слоя на вершине зуба традиционной пилы пакетного резания. Авторами предложена математическая модель для описания рассматриваемого физического процесса.

Ключевые слова: пилы пакетного резания, металлографический анализ, термофрикционное резание, модифицированный контактный слой

О. А. Makarova, A. A. Kozhevnikova, E. A. Makarova, R. S. Kozhevnikov

MATHEMATICAL MODEL OF THE FORMATION OF A MODIFIED CONTACT LAYER DURING HIGH-SPEED CUTTING OF HOT ROLLED METAL

Volgograd State Technical University

The article analyzes the nature of the formation of a modified contact layer on the tooth tip of a traditional batch saw. The authors propose a mathematical model to describe the physical process under consideration.

Keywords: batch saw, metallographic analysis, thermal friction cutting, modified contact layer

В процессе термофрикционного резания горячего трубопроката на участке пакетной резки ТПЦ-2 наблюдается процесс образования тонких слоев нароста на вершинах зубьев классических пил [1, 2]. Статья посвящена исследованию модифицированного контактного слоя, образующегося на вершинах зубьев пилы, а также анализу физических явлений, сопровождающих процесс резания.

В зоне контакта обрабатываемого материала с передней поверхностью инструмента происходит интенсивная передача тепла от горячей заготовки в холодный зуб пилы. В начальный момент контакта происходит приваривание поверхности обрабатываемого материала к поверхности зуба. Это связано с охлаждением обрабатываемого материала непосредственно в зоне контакта с инструментом, что приводит к повышению напряжений и сопротивлению деформированию обрабатываемого материала.

Вследствие приваривания обрабатываемого

материала, к передней поверхности зуба скорость движения отдельных слоев обрабатываемого материала меняется от нуля до скорости стружки. Взаимное перемещение слоев сопровождается деформационными процессами и протекает с меньшими напряжениями на некотором удалении от передней поверхности.

Охлаждение обрабатываемого материала заготовки настолько незначительно, что происходит свободное перемещение отдельных слоев материала относительно друг друга.

Границей, по которой происходит разделение слоев материала можно считать слой металла, имеющий температуру ниже температуры стабилизации.

В конце зоны контакта происходит отделение инструмента от обрабатываемого материала. Слой материала, охлажденный ниже температуры стабилизации, остается на поверхности инструмента и образует тонкий слой модифицированного контактного слоя (рис. 1).



Рис. 1. Периферия зуба пилы с модифицированным контактным слоем $\times 100$

Для нахождения толщины модифицированного контактного слоя определим нагрев зуба пилы от контакта с обрабатываемым материалом. При передаче тепла зуб пилы нагревается, а обрабатываемый материал охлаждается.

На зуб пилы действует полосовой мгновенный источник тепла интенсивностью q_3 . Температура поверхности зуба в контакте равна [3, 4]:

$$\theta_{нов} = \frac{2q_3 \cdot \sqrt{\omega_3 \cdot \tau_k}}{\sqrt{\pi} \cdot \lambda_3} \quad (1)$$

где q_3 – тепловой поток, уходящий в зуб, Дж/м²·с; ω_3 – коэффициент температуропровод-

ности материала пилы, м²/с; λ_3 – коэффициент теплопроводности материала пилы, Вт/м·град.

Продолжительность рабочего хода τ_k , с:

$$\tau_k = \frac{l_k}{v} = \frac{0,250}{100} = 0,0025 \quad (2)$$

где l_k – длина контакта площадки по задней грани пилы, м; v – скорость вращения пилы, м/с.

Средняя длина контакта l_k для пакета труб с наружным диаметром $D = 60$ мм и внутренним диаметром $d = 40$ мм равна 250 мм.

Температура поверхности заготовки в контакте снижается на величину $\Delta\theta$.

$$\theta_{нов} = \theta_{см} - \Delta\theta \quad (3)$$

где $\theta_{нов}$ – температура поверхности в контакте с обрабатываемым материалом; $\theta_{см}$ – температура стабилизации материала заготовки.

На заготовку действует быстро движущийся отрицательный источник тепла (сток тепла) интенсивностью q [3, 4]:

$$\Delta\theta = \frac{4q\sqrt{\omega_{заг} \cdot l_3}}{3\lambda_{заг}\sqrt{\pi \cdot v}} \quad (4)$$

где $\omega_{заг}$ – коэффициент температуропроводности материала заготовки, $\text{м}^2/\text{с}$; v – скорость вращения пилы, $\text{м}/\text{с}$; l_3 – длина контактной площадки по задней грани пилы, м ; $\lambda_{заг}$ – коэффициент теплопроводности материала трубы, $\text{Вт}/\text{м} \cdot \text{град}$.

Решая совместно уравнения (1), (3) и (4), найдем повышение температуры поверхности зуба пилы от контакта с заготовкой:

$$y = \sqrt{4\omega_{заг} \cdot \tau_k \cdot \ln \left(1 + \frac{2\lambda_3 \sqrt{l_3 \cdot \omega_{заг}}}{3\lambda_{заг} \sqrt{\omega_3 \cdot v \cdot \tau_k}} \right)} = \sqrt{4 \cdot 0,0000063 \cdot 0,0025 \cdot \ln \left(1 + \frac{2 \cdot 39 \sqrt{0,0035 \cdot 0,0000063}}{3 \cdot 31 \sqrt{0,0000053 \cdot 100 \cdot 0,0025}} \right)} = 0,046. \quad (7)$$

Расчет ведется для следующих условий: коэффициенты температуропроводности материала пилы (сталь 50ХГФА) и трубы (сталь 12Х13) $\omega_3 = 0,0000053 \text{ м}^2/\text{с}$ и $\omega_{заг} = 0,0000063 \text{ м}^2/\text{с}$, соответственно. Продолжительность рабочего хода $\tau_k = 0,00038 \text{ с}$. Скорость резания $v = 100 \text{ м}/\text{с}$.

$$\theta_{нов} = \frac{\theta_{см}}{1 + \frac{2\lambda_3 \sqrt{l_3 \cdot \omega_{заг}}}{3\lambda_{заг} \sqrt{\omega_3 \cdot v \cdot \tau_k}}} \quad (5)$$

Слой металла, образующий модифицированный контактный слой, охлаждается от температуры стабилизации $\theta_{см}$ до температуры поверхности контакта $\theta_{нов}$.

Тепловой поток через площадку контакта за время τ_k [3, 4]:

$$\theta_{нов} = \theta_{см} \cdot \exp \left(-\frac{y^2}{4\omega_{заг} \cdot \tau_k} \right). \quad (6)$$

При контакте зуба пилы с заготовкой зуб нагревается, и его температура повышается согласно зависимости (6) для плоского неподвижного источника тепла [1].

Преобразовав выражение (6) и учитывая зависимость (5), найдем толщину слоя модифицированного контактного слоя, образовавшуюся за один оборот пилы, мм :

Коэффициенты теплопроводности материала пилы и трубы $\lambda_3 = 39 \text{ Вт}/\text{м} \cdot \text{град}$ и $\lambda_{заг} = 31 \text{ Вт}/\text{м} \cdot \text{град}$ соответственно.

Для традиционной пилы с высоким зубом величина площадки контакта по задней грани $l_3 = 3,5 \text{ мм}$ [5].

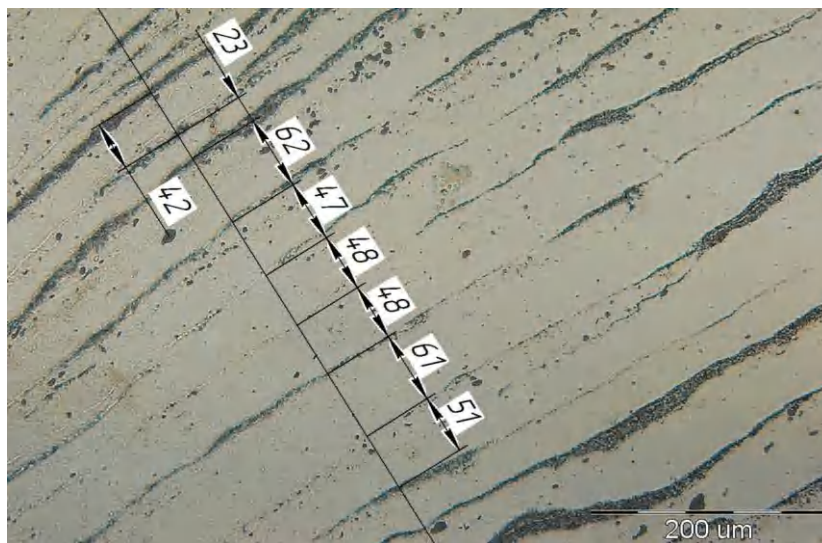


Рис. 2. Толщина отдельных слоев на поверхности контакта зуба пилы с поверхностью заготовки $\times 200$

Средняя толщина слоев на поверхности контакта равна 47,75 мкм (рис. 2). Каждый оборот инструмента приводит к образованию нового тонкого слоя модифицированного контактного слоя, отделяемого от предыдущего оксидной пленкой. Эта пленка образуется из-за взаимодействия горячего металла с кислородом воздуха. Данные процессы влияют на толщину и форму слоев модифицированного контактного слоя.

В результате проведенного исследования авторами получена математическая модель для анализа условий образования модифицированного контактного слоя при пакетной резке холодного металлопроката дисковыми пилами.

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. Банников, А. И. Теоретические основы модернизации пил ударного реза горячего проката : монография / А. И. Банников, А. А. Банников, Ю. Н. Поляничков, О. А. Макарова ; ВолгГТУ. – Волгоград, 2014. – 107 с.
3. Резников, А. Н. Теплофизика процессов механической обработки материалов / А. Н. Резников. – М. : Машиностроение, 1981. – 279 с.
4. Резников, А. Н. Тепловые процессы в технологических системах / А. Н. Резников, Л. А. Резников. – 1990.
5. Зиновьев, В. Е. Теплофизические свойства металлов при высоких температурах. Справочник / В. Е. Зиновьев. – Металлургия, 1989.

УДК 621.941

DOI: 10.35211/1990-5297-2025-3-298-24-27

Д. А. Расторгуев, А. А. Севастьянов

ДИАГНОСТИКА ИЗНОСА РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА С ПОМОЩЬЮ БЕСКОНТАКТНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО И ВИБРАЦИОННОГО МЕТОДОВ

Тольяттинский государственный университет

E-mail: alex-119977@yandex.ru

В статье приводятся результаты экспериментальных исследований диагностики износа режущего инструмента с помощью датчика на основе автогенератора с трансформаторной обратной связью и акселерометра.

Ключевые слова: диагностика процесса резания; износ режущего инструмента; бесконтактная электромагнитная диагностика; вибрации

D. A. Rastorguev, A. A. Sevastyanov

CUTTING TOOL WEAR DIAGNOSTICS USING CONTACTLESS ELECTROMAGNETIC AND VIBRATION METHODS

Togliatty State University

The article presents the results of experimental studies on the diagnostics of cutting tool wear using a sensor based on an autogenerator with transformer feedback and an accelerometer.

Keywords: cutting process diagnostics; cutting tool wear; contactless electromagnetic diagnostics; vibrations

Одним из перспективных направлений повышения эффективности современного машиностроительного производства является разработка систем диагностики и адаптивного управления процессом резания. Целью диагностики является контроль выходных параметров процесса обработки. К ним можно отнести точность размеров, расположения и формы поверхностей, шероховатость. Большинство современных систем диагностики решают задачу мониторинга износа режущего инструмента, поскольку его оперативный контроль необходим для обеспечения высокой точности и качества обработки ответственных деталей в усло-

виях автоматизированного производства [1]. Для автоматизированного производства полезным также является контроль процесса стружкообразования. Система диагностики процесса резания состоит из датчиков, установленных на станке, а также вычислительного устройства и программного обеспечения, способного по сигналам с датчиков поставить диагноз о текущем состоянии процесса обработки [2].

Среди подходов к диагностике процесса резания, связанных с использованием электрических процессов, стоит отметить заслуживающий внимания, но малоизученный метод, основанный на бесконтактной электромагнитной

диагностике процесса резания при помощи устройств на основе трансформаторов. Данный подход предложен д.т.н. Г. Г. Палагнюком в 1980-е годы [3–5]. Однако в то время отсутствовали цифровые средства сбора и анализа данных с датчиков. Поэтому стоит ожидать, что в настоящее время данный подход к диагностике окажется более эффективным за счет анализа большего количества информации, содержащейся в сигнале датчика.

Данный метод основан на использовании зондирующего электрического сигнала высокой частоты. Основным элементом бесконтактной измерительной системы является ферромагнитное кольцо с отдельными генерирующей и измерительной обмотками, каждой с определенным количеством витков. Внутри этого кольца может проходить как инструмент, так и заготовка. Станок, заготовка, инструмент и зона резания образуют электрический контур. Он является элементом автоколебательного конту-

ра, частью которого является ферромагнитное кольцо. Так как такая высокочастотная автоколебательная система является чувствительной к изменению своих параметров, изменения в зоне резания будут модулировать сигнал, наводимый в диагностической обмотке. Зону резания можно представить как параллельно связанные контуры с источниками термоЭДС по передней и задней поверхностям, а также переменные сопротивления контактных поверхностей.

С целью получения информативных сигналов для диагностики износа режущего инструмента проведен эксперимент на токарном станке с ЧПУ модели 16A20. В ходе эксперимента проводилась токарная обработка заготовок из нержавеющей стали марки 10X17H13M2T. Использованы режущие пластины DNMG 150604-43 CT25M. План эксперимента представлен в таблице. Режимы резания: скорость вращения шпинделя $n = 1500$ об/мин, подача $s = 200$ мм/мин, глубина резания $t = 0,5$ мм.

План эксперимента

$N_{пр}$	N_z	d, мм	$N_{пр}$	N_z	d, мм	$N_{пр}$	N_z	d, мм	$N_{пр}$	N_z	d, мм
1	1	40	9	1	32	17	1	24	25	2	27
2	1	39	10	1	31	18	1	23	26	2	26
3	1	38	11	1	30	19	1	22	27	2	25
4	1	37	12	1	29	20	1	21	28	2	24
5	1	36	13	1	28	21	1	20	29	2	23
6	1	35	14	1	27	22	2	30	30	2	22
7	1	34	15	1	26	23	2	29	31	2	21
8	1	33	16	1	25	24	2	28	32	2	20

$N_{пр}$ – номер прохода; N_z – номер заготовки; d – диаметр заготовки до прохода, мм.

В ходе эксперимента производилась запись сигналов с двух датчиков. Первый представлял собой автогенератор с трансформаторной обратной связью.

В качестве прототипа данной электронной схемы была выбрана схема из [6, рис. 4.1]. Обмотки датчика, содержащие по 50 витков каждая, намотаны на кольцевой ферритовый сердечник марки M1000NH размерами: наружный диаметр 100 мм, внутренний диаметр 60 мм, толщина 15 мм. Запись сигнала с одной из обмоток трансформатора производилась при помощи платы сбора данных lcard E-440 на частоте 100 кГц. Второй датчик представлял собой акселерометр BC 111 компании ZETLAB. Сигнал акселерометра записан при помощи платы ZET017U2 компании ZETLAB на частоте 50 кГц. По резкому ухудшению качества поверхности

судили о начале катастрофического износа инструмента.

В результате анализа сигналов датчиков выявлены информативные признаки для диагностики износа режущего инструмента. Основными информативными признаками сигнала с автогенератора являются амплитудно-частотные признаки, поскольку автоколебательные системы очень чувствительны к изменению своих параметров и реакция проявляется в виде изменения собственных частот колебаний и расширения спектра. Выявлена зависимость трех частот колебаний напряжения на измерительной обмотке автогенератора от изменения условий обработки. Обработка сигналов проводилась в среде MATLAB. По изменению значений собственных частот колебаний можно проводить диагностику износа резца (рис. 1).

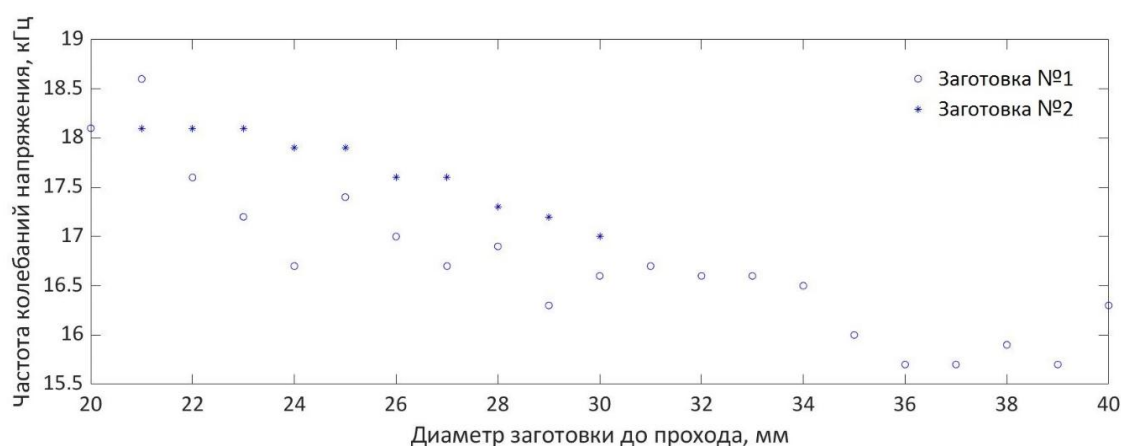


Рис. 1. Значения первой собственной частоты колебаний напряжения

Так, из рисунка 1 видно, что по мере роста износа инструмента растет значение первой собственной частоты колебаний напряжения на измерительной обмотке автогенератора. При обработке заготовок одного и того же диаметра резец более изношен к точению заготовки № 2, что видно по увеличенным значениям частоты. Также по сигналу датчика возможно установить порог отсечения по качеству обработанной поверхности заготовки. Так, в данном эксперименте порогом служит значение сигнала при

проходе № 27 (диаметр 25 мм), которому соответствует значение частоты сигнала около 18 кГц, в то время как для предыдущего прохода получено значение частоты в 17,5 кГц. Таким образом, при достижении первой собственной частотой автоколебаний значения около 17,5 кГц резец необходимо менять. Подобные пороги можно также установить для других собственных частот автогенератора. Аналогичный результат можно получить по сигналу акселерометра (рис. 2).

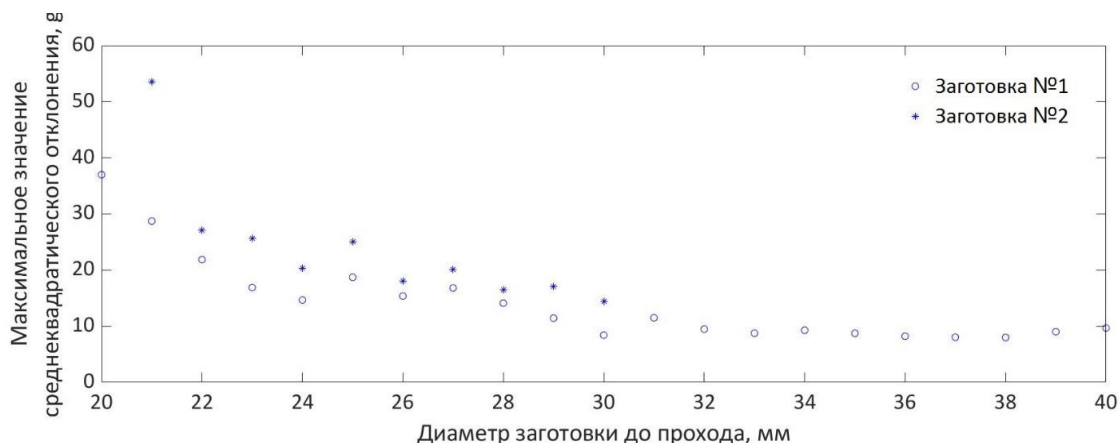


Рис. 2. Максимальное среднеквадратичное отклонение виброускорения

Таким образом, новый прибор на основе автогенератора с трансформаторной обратной связью способен диагностировать износ режущего инструмента. Дальнейшие исследования могут быть посвящены извлечению большего числа информативных признаков сигнала с автогенератора для повышения эффективности диагностики. Также для повышения эффективности диагностики можно записывать сигнал с обеих обмоток автогенератора и использовать фазовые сдвиги напряжения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кабалдин, Ю. Г. Разработка цифрового двойника режущего инструмента для механообрабатывающего производства / Ю. Г. Кабалдин, Д. А. Шатагин, А. М. Кузьмишина // Тенденции развития науки и образования. – 2018. – № 45–8. – С. 50–57.
2. Кабалдин, Ю. Г. Разработка «цифрового двойника» токарного станка с ЧПУ / Ю. Г. Кабалдин, Д. А. Шатагин, П. В. Колчин // Тенденции развития науки и образования. – 2018. – № 45–8. – С. 44–50.
3. Авторское свидетельство № 648349 А1 СССР, МПК В23В 49/00, В23Q 15/00. Устройство для измерения износа режущего инструмента: № 2356669 : заявл. 03.05.1976: опубл. 25.02.1979 / В. Л. Заковоротный, Г. Г. Па-

лагнюк ; заявитель Ростовский-на-Дону институт сельскохозяйственного машиностроения.

4. Авторское свидетельство № 1122476 А1 СССР, МПК В23Q 15/00. Устройство для диагностики состояния процесса резания: № 3644402 : заявл. 19.09.1983: опубл. 07.11.1984 / Г. Г. Палагнюк, В. Д. Савельев, А. И. Накашидзе, Г. А. Козик ; заявитель Ростовский-на-Дону ордена Трудового Красного Знамени институт сельскохозяйственного машиностроения.

5. Авторское свидетельство № 1249393 А1 СССР, МПК G01N 3/58. Устройство для исследования процесса резания: № 3659892: заявл. 10.11.1983: опубл. 07.08.1986 / Г. Г. Палагнюк, Г. А. Козик, А. И. Накашидзе, В. Д. Савельев ; заявитель Ростовский-на-Дону ордена Трудового Красного Знамени институт сельскохозяйственного машиностроения.

6. Матью Мэндл. 200 избранных схем электроники / Матью Мэндл. – М. : Мир, 1985. – 350 с., ил.

УДК 621.91

DOI: 10.35211/1990-5297-2025-3-298-27-30

В. А. Солодков, С. И. Кормилицин, П. А. Норченко

СРАВНЕНИЕ ТЕПЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК УСТАНОВИВШЕГОСЯ И ПРЕРЫВИСТОГО РЕЗАНИЯ

Волгоградский государственный технический университет

E-mail: v-a-solodkov@yandex.ru, fpo@vstu.ru, norchenko.p.a@yandex.ru

При врезании величина тепловых характеристик с высокой скоростью приближаются к значениям таких же характеристик для установившегося резания, выполняемого в тех же условиях обработки. Основной причиной подобного явления является более высокая интенсивность тепловыделений при врезании.

Ключевые слова: тепловые характеристики, врезание, установившееся резание, прерывистое резание, интенсивность тепловыделений

V. A. Solodkov, S. I. Kormilitsin, P. A. Norchenko

COMPARISON OF THERMAL CHARACTERISTICS STEADY AND INTERMITTENT CUTTING

Volgograd State Technical University

When cutting, the thermal characteristics at high speed approach the values of the same characteristics for steady cutting performed under the same processing conditions. The main reason for this phenomenon is the higher intensity of heat emissions during cutting.

Keywords: thermal characteristics, embedding, steady cutting, intermittent cutting, heat release intensity

В настоящих исследованиях расчет тепловых характеристик на рабочих поверхностях инструмента производился по методике профессора А. Н. Резникова, в основе которой лежит наиболее распространенный в технологической теплофизике метод решения дифференциального уравнения теплопроводности – ме-

тод источников теплоты [1]. При этом использовалась общепринятая схема распределения источников и стоков тепла при установившемся и прерывистом резании.

Сравнительные расчеты температуры резания при всех вариантах обработки производились по следующей итоговой формуле [1]:

$$\theta = \frac{l_1^2 \cdot M_1}{\lambda_p \cdot (l_1 + l_2)} \cdot \frac{0,142 \cdot \frac{\sqrt{\omega}}{\lambda} \cdot \sqrt{\frac{K \cdot l_1}{V}} \cdot q_{1T} + (1+C) \cdot \theta_g}{M_1 \cdot \frac{l_1}{\lambda_p} + \frac{\Delta}{40 \cdot \lambda} + 0,184 \cdot \frac{\sqrt{\omega}}{\lambda} \cdot \sqrt{\frac{K \cdot l_1}{V}}},$$

где l_1 – длина площадки источника теплоты, мм; M_1 – безразмерная величина; l_2 – ширина площадки источника теплоты, мм; λ_p – коэффициент теплопроводности инструментального материала, кал/(см.с.с°); λ – коэффициент теплопроводности обрабатываемого материала, кал/(см.с.с°); ω – коэффициент температуропро-

водности обрабатываемого материала, см²/с; K – коэффициент продольной стружки; q_{1T} – теплота трения на площадке контакта между стружкой и передней поверхностью, кал/(см².с); Δ – высота зоны нараста (контактной зоны), мм; θ_g – температура деформации, кал/(см².с); v – скорость резания, м/мин; C – коэффициент,

учитывающий подогрев поверхностных слоев материала, из которых образуется стружка.

Для расчета тепловых характеристик необходимо использование следующих данных:

– параметры обрабатываемого материала: марка; коэффициент температуропроводности ω [$\text{см}^2/\text{с}$]; коэффициент теплопроводности λ [$\text{кал}/\text{см}\cdot\text{с}\cdot^\circ\text{C}$]; предел выносливости на сжатие σ_{-B} [$\text{кГс}/\text{мм}^2$];

– параметры режущего инструмента: режущий материал и его свойства; геометрия режущей части – γ , β , α , φ , φ_1 [$^\circ$]; коэффициент теплопроводности λ_p [$\text{кал}/\text{см}\cdot\text{с}\cdot^\circ\text{C}$]; длина контакта по задней поверхности l_2 [мм]; диаметр инст-

румента (фрезы) d_ϕ [мм]; коэффициент температуропроводности ω_p [$\text{см}^2/\text{с}$];

– режимы резания: скорость резания v [$\text{м}/\text{мин}$]; ширина срезаемого слоя b [мм]; подача s [$\text{мм}/\text{об}$]; толщина среза a [мм]; длительность рабочего хода τ_p [с]; длительность холостого хода τ_x [с];

– силы резания P_z , P_y , P_x [кГс]; усадка стружки k ; высота нароста Δ [мм]; длина контакта по передней поверхности l_1 [мм].

Сведем исходные данные в таблицы отдельно для постоянных величин (табл. 1) и отдельно для переменных величин (табл. 2):

Таблица 1

Постоянные исходные данные

Наименование показателя	Обозначение	Величина
Материал пары инструмент–заготовка	–	T5K10 – сталь 45
Диаметр обработки (фрезы или заготовки), мм	D_ϕ (d)	160
Ширина фрезерования (прерывистое резание), мм	B	90
Подача на оборот (зуб), мм/об(мм/зуб)	$S_o = S_z$	0,2
Глубина резания, мм	t	1
Передний угол, $^\circ$	γ	0
Главный задний угол, $^\circ$	α	10
Главный угол в плане, $^\circ$	φ	45
Вспомогательный угол в плане, $^\circ$	φ^*	15
Угол клина, $^\circ$	β^*	68
Длина контакта по задней поверхности, мм	l_2	0,1
Толщина среза, мм	a	0,141
Ширина срезаемого слоя, мм	b	1,414
Характеристики обрабатываемого материала:		
коэффициент температуропроводности, $\text{см}^2/\text{с}$	ω	0,084
коэффициент теплопроводности, $\text{кал}/\text{см}\cdot\text{с}\cdot^\circ\text{C}$	λ	0,11
предел выносливости на сжатие, $\text{кГс}/\text{мм}^2$	σ_{-B}	60
Характеристики инструментального материала:		
коэффициент температуропроводности, $\text{см}^2/\text{с}$	ω_p	0,144
коэффициент теплопроводности, $\text{кал}/\text{см}\cdot\text{с}\cdot^\circ\text{C}$	λ_p	0,09

Главным критерием и необходимым условием при выборе исходных данных являлась идентичность следующих параметров процессов прерывистого и установившегося резания: материал инструмента и заготовки, диаметр обработки, геометрия инструмента, подача на оборот (зуб), параметры срезаемого слоя (глубина резания, толщина и ширина срезаемого слоя) и скорость резания. Для расчета были выбраны три скоростных режима – при 150, 120

и 90 м/мин. Для скорости резания и параметров срезаемого слоя важным также является соблюдение условия постоянства по длине реза.

Как видно из таблицы 2, такие характеристики, как длина контакта по передней поверхности, усадка стружки, высота контактной зоны, угол сдвига и составляющие силы резания при прерывистом и установившемся резании различаются весьма существенно. Природа этих отличий и их закономерности описаны в [2].

Таблица 2

Переменные исходные данные

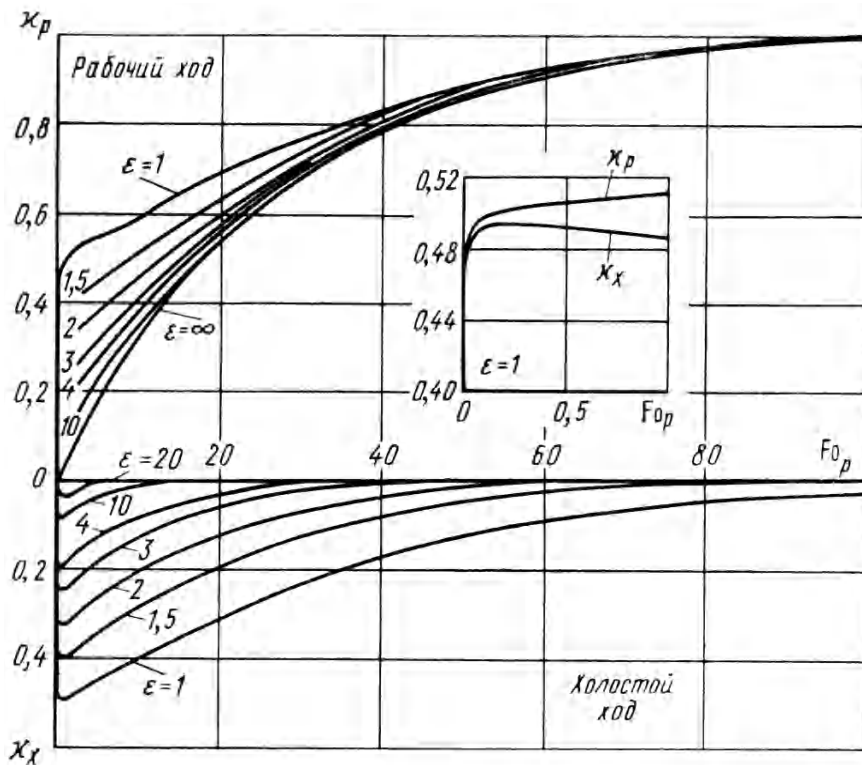
Наименование показателя	Расчетная формула	Величина					
Скорость резания, м/мин	v	150		120		90	
Характер резания (н – непрерывное, п – прерывистое)	–	н	п	н	п	н	п
Длина контакта по передней поверхности, мм	l_1	0,92	0,61	1,01	0,69	1,17	0,83
Высота контактной зоны, мм	Δ	0,072	0,051	0,088	0,057	0,114	0,071
Усадка стружки	K	2,51	2,12	2,79	2,28	3,16	2,38
Угол сдвига, °	Φ (β)	22	25	20	24	18	23
Время рабочего хода, с	τ_p	0,201	0,076	0,251	0,096	0,335	0,127
Время холостого хода, с	τ_x	0	0,125	0	0,156	0	0,208
Составляющие силы резания, кГс:							
осевая	P_{zo}	57,2	41,3	61,1	54,9	66,7	57,9
радиальная	P_{xyo}	42,7	35,2	44,2	37,7	48,8	41,9

Сам сравнительный расчет пошагово представлен в работе [3].

При этом при расчете тепловых характеристик прерывистого резания в соответствии с указаниями автора [1] в методику расчета для прерывистого резания вносились следующие коррективы с учетом рисунка.

При прерывистом резании процесс резания состоит из периодически повторяющихся рабо-

чего хода, во время которого выделяется тепло и холостого хода, во время которого теплота в режущий клин не поступает. Поэтому анализ закономерностей теплообмена при прерывистом резании с регулярно повторяющимися циклами требует при расчете тепловых характеристик вводить поправки χ_p и χ_x соответственно для определения температуры θ_p в конце рабочего хода и θ_x в конце холостого хода.



Функции χ_p и χ_x , используемые для расчета температуры при прерывистом резании [1]

Линия $\varepsilon = \infty$ на рис. 1 описывает закономерность нарастания температуры резания при единичном рабочем ходе.

При многократном повторении рабочих и холостых ходов температура резания тем выше температуры одиночного реза, чем меньше длительность холостого хода по отношению к рабочему (уменьшение ε). Это естественно, поскольку с уменьшением ε теплота в инстру-

менте накапливается более интенсивно. Однако даже при малых значениях ε температура установившихся процессов с высокой частотой прерывания ниже температуры при установившемся теплообмене.

Пошаговый расчет, выполненный в [3] позволил получить сравнительную величину тепловых характеристик для прерывистого и установившегося резания (табл. 3).

Таблица 3

Переменные исходные данные

Наименование показателя	Расчетная формула	Величина					
Скорость резания, м/мин	v	150		120		90	
Характер резания (н – непрерывное, п – прерывистое)	–	н	п	н	п	н	п
Интенсивность теплообразующего источника от энергии трения на передней поверхности, кал/см ² с	q_{IT}	10899	15863	7409	11220	4699	7494
Расчетная средняя температура на передней поверхности, °С	$\theta_{1рас}^{cp}$	722	586	622	589	611	328
Расчетная средняя температура на задней поверхности, °С	$\theta_{2рас}^{cp}$	317	288	324	339	329	328
Расчетная температура резания, °С	$\theta_{рас}$	682	544	631	557	588	504
Опытная температура резания (по методу естественной термопары), °С	$\theta_{оп}$	665	592	624	574	577	529
Абсолютное отклонение, °С	Δ	17	48	7	17	11	25
Относительное отклонение, %	δ	2,5	8,8	1,1	3,1	1,9	4,9

Сопоставление расчетных и экспериментальных данных позволяет говорить о достаточно хорошей их сходимости. Значения интенсивностей тепловыделения на передней поверхности, рассчитанные для различных скоростных режимов в условиях установившегося и прерывистого резания, позволяют сделать заключение о правильности сделанного предположения относительно существенно большей интенсивности тепловыделения при прерывистом резании.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Резников, А. Н. Теплофизика процессов механической обработки материалов / А. Н. Резников. – М. : Машиностроение, 1981. – 279 с.
2. Солодков, В. А. Физические основы контактных процессов при прерывистом резании : монография / В. А. Солодков ; ВолгГТУ. – Волгоград, 2018. – 156 с.
3. Солодков, В. А. Температурные особенности прерывистого резания / В. А. Солодков, С. И. Кормилицин, П. А. Норченко // Машиностроение : сетевой электронный научный журнал. – 2019. – Т. 7, № 3. – С. 30–35. – URL : <http://www.indust-engineering.ru/issues/2019/2019-3.pdf>.

УДК 621.91

DOI: 10.35211/1990-5297-2025-3-298-31-34

*В. А. Солодков, С. И. Кормилицин, П. А. Норченко***МЕТОДИКА РАСЧЕТА ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПАРАМЕТРОВ
УСТАНОВИВШЕГОСЯ И ПРЕРЫВИСТОГО РЕЗАНИЯ
В ОДИНАКОВЫХ УСЛОВИЯХ****Волгоградский государственный технический университет**

E-mail: v-a-solodkov@yandex.ru, fpo@vstu.ru, norchenko.p.a@yandex.ru

Принято считать, что при прерывистом резании интенсивность тепловыделения, а следовательно, и температура при врезании существенно ниже по сравнению с установившимся резанием. Однако, как показывают результаты эксперимента, величина параметров, влияющих на температуру при прерывистом резании, соответствует более высокой интенсивности тепловыделений и более высокой температуре резания.

Ключевые слова: температурные параметры, врезание, установившееся резание, прерывистое резание, интенсивность тепловыделений

*V. A. Solodkov, S. I. Kormilitsin, P. A. Norchenko***THE METHOD OF CALCULATING THE TEMPERATURE
PARAMETERS OF STEADY AND INTERMITTENT
CUTTING UNDER THE SAME CONDITIONS****Volgograd State Technical University**

It is generally assumed that with intermittent cutting, the intensity of heat release and, consequently, the temperature during cutting is significantly lower compared to steady cutting. However, as the experimental results show, the magnitude of the parameters affecting the temperature during intermittent cutting corresponds to a higher intensity of heat generation and a higher cutting temperature.

Keywords: temperature parameters, embedding, steady cutting, intermittent cutting, heat release intensity

В данном исследовании представлен пошаговый расчет температурных параметров установившегося и прерывистого резания при одинаковых условиях обработки. Используемая методика расчета [1] позволяет выполнять такие расчеты и обеспечивает хорошее совпадение с экспериментальными данными. Необходимость выполнения такого расчета связана с результатами экспериментальных исследований роста температуры резания при врезании инструмента в обрабатываемый материал. Для проверки сходимости результатов экспериментальных исследований и результатов теоретических расчетов особое внимание обращалось, во-первых, абсолютное совпадение условий непрерывной и прерывистой обработки, и во-вторых, на использование в теоретических расчетах только тех экспериментальных данных (угол сдвига, усадка стружки, длина контакта, высота контактной зоны, силы резания), которые получены при выполнении обоих видов обработки в абсолютно одинаковых условиях. При этом с расчетом можно сравнивать только

один результат эксперимента, а именно, температуру резания. Для измерения температуры резания использовался универсальный метод – метод естественной термопары, позволяющий оценить в любое мгновение процесса резания. Использование этого метода при прерывистом резании показывает практически мгновенное увеличение температуры резания до высоких значений (близких к температуре установившегося резания при тех же условиях обработки) в момент врезания. Причины подобного явления выявлены ранее [2] и связаны с более высокой скоростью пластической деформации, прежде всего, в контактной зоне на передней поверхности инструмента.

В таблице представлен подробный расчет температурных параметров установившегося и прерывистого резания в одинаковых условиях обработки для трех скоростей резания: 90 м/мин, 120 м/мин и 150 м/мин. В каждом шаге расчета приводится расчетная формула и промежуточные результаты расчета по этой формуле.

Продолжение таблицы

1	2	3	4	5	6	7	8
Средняя температура на площадке контакта стружки с резцом, °C	$\theta_c^{\text{cp}} = (1 + c) \cdot \theta_d + 0,142 \cdot \sqrt{\omega} / \lambda \cdot L_c \cdot \sqrt{k \cdot l_1 / v} \cdot (q_{1T} - 1,3 \cdot q_1) = a_1 - b_1 \cdot q_1$	—	—	—	—	—	—
коэффициент a_1		767,70	709,30	709,96	723,37	662,4	659,75
коэффициент b_1		0,060	0,045	0,075	0,056	0,099	0,072
Коэффициент распределения температуры, вызванной теплотой деформации, на задней поверхности	$\xi = l_2 \cdot \text{tg} \Phi / (2 \cdot a)$	0,141	0,167	0,127	0,155	0,112	0,149
Функция температуры на задней поверхности, вызванной теплотой деформации	$T_n \approx \sqrt{1 + \xi} - \sqrt{\xi}$	0,693	0,672	0,705	0,681	0,720	0,686
Средняя температура на задней поверхности	$\theta_n^{\text{cp}} = (1 + c) \cdot \theta_d \cdot T_n + 0,1 \cdot \sqrt{\omega \cdot l_2} / (\lambda \cdot \sqrt{v}) \cdot (q_{2T} - 1,82 \cdot q_2) = a_2 - b_2 \cdot q_2$	—	—	—	—	—	—
коэффициент a_2		298,91	223,87	306,33	270,42	311,45	258,78
коэффициент b_2		0,012	0,012	0,014	0,014	0,016	0,016
Безразмерный коэффициент длины контакта по передней поверхности	$\eta_1 = b/l_1$	1,537	2,318	1,400	2,050	1,209	1,704
Безразмерный коэффициент длины контакта по задней поверхности	$\eta_2 = b/l_2$	14,142	14,142	14,142	14,142	14,142	14,142
Для прерывистого резания необходимо ввести поправки на величину рабочего и холостого ходов для расчета функции температуры на передней поверхности в конце данных ходов. Данные поправки χ_p и χ_x определяются из графика на основании следующих данных (рисунок 1 [3]):							
безразмерный коэффициент времени рабочего хода	$F_{0p} = 100 \cdot \omega_p \cdot \tau_p / l_1^2$	3,421	2,959	3,548	2,891	3,525	2,664
относительный коэффициент рабочих ходов	$\varepsilon = \tau_p / \tau_x$	∞	0,614	∞	0,614	∞	0,614
поправка на величину рабочего хода χ_p	—	—	0,520	—	0,520	—	0,520
поправка на величину холостого хода χ_x	—	—	0,460	—	0,460	—	0,460
Функция температуры на передней поверхности (для рабочего хода при прерывистом резании)	$M_{1(p)} = (\chi_p) \cdot (4,88 + 2,64 \cdot \eta_1^{0,5} \cdot \lg \eta_1) \cdot \beta^{-0,85}$, при $\eta_1 \geq 1$; $M_{1(p)} = (\chi_p) \cdot (4,88 + 3,92 \cdot \eta_1^{0,5} \cdot \lg \eta_1) \cdot \beta^{-0,85}$, при $\eta_1 \leq 1$	0,152	0,091	0,148	0,087	0,142	0,082
Функция температуры на задней поверхности	$M_2 = (4,88 + 2,64 \cdot \eta_2^{0,5} \cdot \lg \eta_2) \cdot \beta^{-0,85}$, при $\eta_2 \geq 1$; $M_2 = (4,88 + 3,92 \cdot \eta_2^{0,5} \cdot \lg \eta_2) \cdot \beta^{-0,85}$, при $\eta_2 \leq 1$	0,451	0,451	0,451	0,451	0,451	0,451
Относительный показатель	l_1/l_2	9,200	6,100	10,100	6,900	11,700	8,300
Относительный показатель	l_2/l_1	0,109	0,164	0,099	0,145	0,085	0,120
Функция, используемая при расчете тепловых потоков в резце $B(l_1/l_2)$	—	0,856	1,139	0,794	1,051	0,712	0,919
Функция, используемая при расчете тепловых потоков в резце $B(l_2/l_1)$	—	3,816	3,788	3,821	3,798	3,834	3,810
Вспомогательные функции длин контактных площадок							
на передней поверхности G_1	$G_1 = 0,04 + 0,02 \cdot \eta_1^{0,6} \cdot \lg \eta_1$, при $\eta_1 \geq 1$; $G_1 = 0,04 + 0,028 \cdot \eta_1^{0,22} \cdot \lg \eta_1$, при $\eta_1 \leq 1$	0,045	0,052	0,044	0,050	0,042	0,046

Окончание таблицы

1	2	3	4	5	6	7	8
на задней поверхности G_2	$G_2 = 0,04 + 0,02 \cdot \eta_2^{0,6} \cdot \lg \eta_2$, при $\eta_2 \geq 1$; $G_2 = 0,04 + 0,028 \cdot \eta_2^{0,22} \cdot \lg \eta_2$, при $\eta_2 \leq 1$	0,153	0,153	0,153	0,153	0,153	0,153
Функции, учитывающие взаимный нагрев площадок							
передней поверхности N_1	$N_1 = G_1 \cdot B(l_2/l_1)$	0,171	0,197	0,167	0,188	0,160	0,177
задней поверхности N_2	$N_2 = G_2 \cdot B(l_1/l_2)$	0,131	0,131	0,131	0,131	0,131	0,131
Средняя температура на передней поверхности	$\theta_1^{\text{cp}} = M_{1p} \cdot q_1 \cdot l_1 / \lambda_p + N_2 \cdot q_2 \cdot l_2 / \lambda_p = a_3 \cdot q_1 + b_3 \cdot q_2$	–	–	–	–	–	–
коэффициент a_3		1,554	0,620	1,659	0,669	1,843	0,754
коэффициент b_3		0,145	0,145	0,145	0,145	0,145	0,145
Средняя температура на задней поверхности	$\theta_2^{\text{cp}} = M_2 \cdot q_2 \cdot l_2 / \lambda_p + N_1 \cdot q_1 \cdot l_1 / \lambda_p = a_4 \cdot q_1 + b_4 \cdot q_2$	–	–	–	–	–	–
коэффициент a_4		1,749	1,338	1,869	1,444	2,086	1,629
коэффициент b_4		0,502	0,502	0,502	0,502	0,502	0,502
Решив уравнения: $\{a_1 - (b_1 + \Delta/(40 \cdot \lambda)) \cdot q_1 = a_3 \cdot q_1 + b_3 \cdot q_2\}$ и $\{a_2 - b_2 \cdot q_2 = a_4 \cdot q_1 + b_4 \cdot q_2\}$ совместно, получим значения интенсивностей теплообразующих источников:							
на передней поверхности q_1		601	2166	509	1959	416	1526
на задней поверхности q_2		-1463	-5202	-1249	-4962	-1975	-4303
Средняя температура на передней поверхности	$\theta_1^{\text{cp}} = a_3 \cdot q_1 + b_3 \cdot q_2$	722	586	662	589	611	525
Средняя температура на задней поверхности	$\theta_2^{\text{cp}} = a_4 \cdot q_1 + b_4 \cdot q_2$	317	288	324	339	329	328
Температура резания – средняя температура на всей контактной поверхности инструмента со стружкой и деталью	$\theta = (\theta_1^{\text{cp}} \cdot l_1 + \theta_2^{\text{cp}} \cdot l_2) / (l_1 + l_2)$	682	544	631	557	588	504

Анализ представленной методики расчета позволяет сделать выводы о том, что при расчете учитываются все факторы влияющие на температурные параметры как установившегося, так и прерывистого резания. При этом полученные результаты (представлены в работе [3]) позволяют утверждать, что температурные параметры обоих видов обработки достаточно близки, а некоторые (например интенсивность тепловыделений) при прерывистом резании даже выше, чем при установившемся. Достоверность полученных данных выше достоверности данных, полученных ранее, так как в расчетах использовались реальные экспери-

ментальные данные, значительно отличающиеся от полученных и использованных ранее.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Резников, А. Н. Теплофизика процессов механической обработки материалов / А. Н. Резников. – М. : Машиностроение, 1981. – 279 с.
2. Солодков, В. А. Физические основы контактных процессов при прерывистом резании : монография / В. А. Солодков ; ВолгГТУ. – Волгоград, 2018. – 156 с.
3. Солодков, В. А. Температурные особенности прерывистого резания / В. А. Солодков, С. И. Кормилицин, П. А. Норченко // Машиностроение : сетевой электронный научный журнал. – 2019. – Т. 7, № 3. – С. 30–35. – URL : <http://www.indust-engineering.ru/issues/2019/2019-3.pdf>.

УДК 621.9

DOI: 10.35211/1990-5297-2025-3-298-35-37

*Н. А. Толстяков¹, А. Р. Ингеманссон²***ОБОСНОВАНИЕ ДИАПАЗОНОВ ВАРЬИРОВАНИЯ ФАКТОРОВ
ПРИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ ГЛУБОКОГО СВЕРЛЕНИЯ
НА МНОГОЦЕЛЕВЫХ СТАНКАХ С ЧПУ**¹Волгоградский государственный технический университет²АО «Федеральный научно-производственный центр «Титан-Баррикады»

E-mail: tolstijcov@mail.ru; aleing@yandex.ru

Рассмотрены рекомендации по назначению режимов резания на операции глубокого сверления из различных источников. Выбраны режимы резания в соответствии с характером планируемого эксперимента и особенностями выполняемой технологической операции. Выбраны уровни варьирования подачи и скорости резания для разрабатываемой математической модели.

Ключевые слова: режимы резания, глубокое сверление, планирование эксперимента

*N. A. Tolstyakov¹, A. R. Ingemansson²***JUSTIFICATION OF THE RANGES OF VARYING
OF FACTORS IN EXPERIMENTAL STUDIES
OF DEEP DRILLING ON MULTI-PURPOSE CNC MACHINES**¹Volgograd State Technical University²JSC «Federal Scientific and Production Centre «Titan-Barrikady»

Recommendations for the appointment of cutting modes for operation of deep drilling from various sources were considered. Cutting modes were selected in accordance with the nature of the planned experiment and the characteristics of the technological operation being performed. The levels of varying of factors of the feed and the cutting speed are assigned for the developed mathematical model.

Keywords: cutting modes, deep hole drilling, experiment planning

Введение

Глубокое сверление является довольно важной и неотъемлемой частью технологического процесса изготовления многих сложных деталей. В то же время этот тип обработки резанием является одним из самых проблемных в производстве и недостаточно изученным в технологической науке. Сверление называется глубоким, если соотношение длины обрабатываемого отверстия к его диаметру превышает 4-кратную величину [1].

Процесс глубокого сверления сопряжен с большим количеством трудностей, в числе которых, и нестабильный процесс стружкообразования, и малая жесткость сверла при проведении обработки отверстия, и короткий период стойкости сменных многогранных пластин (далее СМП) в условиях длительного характера обработки [2].

Многие исследователи предполагают, что влияние этих проблем на качество и производительность обработки можно уменьшить путем подбора рациональных режимов резания, а именно скорости вращения шпинделя станка и скорости подачи инструмента в зоне обработки.

Существует множество различных рекомендаций по выбору режимов резания для подобного вида металлообработки. Данная работа ставит задачами рассмотрение этих рекомендаций и выбор наиболее рациональных из них, исходя из особенностей планируемого эксперимента и особенностей выполняемой технологической операции.

В последствии выбранные режимы резания будут использованы для проведения серии экспериментов по построению многофакторной и многоуровневой математической модели, которая будет использована для технологии адаптивного управления резанием – наиболее прогрессивном методе адаптации режимов резания к нестабильным и непостоянным условиям обработки металла. Установленные на стадии технологического проектирования режимы резания корректируются в автоматизированном режиме при различных условиях резания и состоянии обрабатываемого металла при использовании названной технологии.

Методика

Анализ входных факторов для операции глубокого сверления на многоцелевом станке

с ЧПУ выполнен в работе [3]. Актуальным вопросом, решение которого описано в данной статье, является обоснование диапазонов варьирования факторов при экспериментальных исследованиях.

Планируемая к разработке модель имеет 4 следующих входных параметра: твердость обрабатываемого материала, HB; теплопроводность СМП, Вт/м*К; скорость резания, м/мин; подача, мм/об. Планирование эксперимента при построении модели выполнялась с использованием современных методик и рекомендаций [4]. Функциями отклика для разрабатываемых моделей являются сила резания P_z , Н и шероховатость обрабатываемой поверхности R_a , мкм.

На современных многоцелевых станках с ЧПУ обработка глубоким сверлением выполняется корпусным инструментом, оснащенным СМП. В экспериментальных исследованиях использованы корпус сверла K5D34032-11 и пластины к нему, имеющие формы квадрата (SOMT по ISO 1832) и ломаного четырехгранника (XOMT по ISO 1832). Для выбора диапазонов варьирования режимов резания необхо-

димо оценить свойства инструментального и обрабатываемого материалов и особенностей выполняемой операции.

Это обусловлено тем, что модель в части обрабатываемого материала и твердосплавных СМП отражает реальные условия обработки и широкий спектр используемого на производстве инструмента. Требуется определить уровни варьирования режимов резания для подготавливаемой математической модели.

Анализ рекомендаций по выбору режимов резания выполняется с использованием справочной литературы [5, 6], рекомендаций производителей инструмента [7] и накопившегося опыта в практике машиностроительного производства – производственного опыта операторов обрабатывающих центров с ЧПУ (далее ОЦ с ЧПУ), производящих обработку глубоких отверстий.

Результаты

Рекомендуемые диапазоны варьирования скорости резания и подачи в зависимости от твердости конструкционной легированной стали приведены в табл. 1.

Таблица 1

Рекомендуемые значения режимов резания из различных научно-технических источников при различных величинах твердости обрабатываемого металла.
Параметры данные в скобках показывают допустимый диапазон значений

Источник	Скорость резания 380 HB м/мин	Подача 380 HB мм/об	Скорость резания 300 HB м/мин	Подача 300 HB мм/об	Скорость резания 220 HB м/мин	Подача 220 HB мм/об
Справочник технолога под общей редакцией А. Г. Суслова	130	0,21–0,24	130	0,21–0,25	130	0,33–0,36
Справочник технолога под общей редакцией А.Г. Косиловой и Р. К. Мещерякова	243,7	0,17–0,21	243,7	0,17–0,21	243,7	0,21–0,25
Производственные рекомендации компании Botek	–	–	55–75	01–0,13	70–80	0,1–0,14
Каталог инструмента Korloy	70 (30~120)	0,06~0,12	100 (50~160)	0,05~0,15	100 (50~150)	0,06~0,14
Сложившаяся на производстве практика обработки	70	0,12	70	0,12	70	0,12

Был проведен анализ рекомендуемых режимов резания с учетом используемых твердых сплавов и особенностей выполненных операций. В экспериментальном исследовании использовались твердосплавные СМП без покрытия, а также с CVD- и PVD-покрытием.

Кроме этого, следует учитывать рекомендации, приведенные в источнике [7], согласно которым при использовании сверл с длинной рабочей части 5D необходимо уменьшать режимы резания на 30–40 %. При окончательном назначении режимов резания данный фактор также

необходимо учитывать. Режимы в приведенной выше таблице даны без учета этой поправки.

В результате полного анализа названных

источников для серии экспериментов назначены следующие уровни варьирования режимов резания (табл. 2).

Таблица 2

Выбранные уровни варьирования режимов резания

Уровень варьирования	-1	0	+1
Скорость резания, м/мин	40	70	100
Подача, мм/об	0,08	0,12	0,16

Выводы

1. Рассмотрены подходы по выбору режимов резания в различной научно-технической литературе и производственной практике машиностроительного предприятия.

2. Выбраны наиболее рациональные режимы резания для серии экспериментов по получению данных для составления математической модели по анализу процесса глубокого сверления.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Обработка глубоких отверстий в машиностроении : справочник / С. В. Кирсанов, В. А. Гречишников, С. Н. Григорьев, А. Г. Схиртладзе ; под общ. ред. С. В. Кирсанова. – Москва, 2010. – 344 с. – ISBN 978-5-94275-521-8. – EDN PVJNMJ.
2. Уткин, Н. Ф. Обработка глубоких отверстий / Н. Ф. Уткин, Ю. И. Кижняев, С. К. Плужников, А. А. Шаманин [и др.]. – Ленинград : Машиностроение, 1988. – 269 с.
3. Толстяков, Н. А. Разработка и обоснование методики эксперимента по исследованию условий сверления в крупногабаритных заготовках при неравномерном распределении твердости / Н. А. Толстяков, А. Р. Ингемансон // Наукоемкие технологии машиностроения, авиации и транспорта : XVI Международная научно-техническая конференция. – Ростов-на-Дону : ДГТУ, 2024. – С. 68–71.
4. Чигиринская, Н. В. Моделирование неперiodических стохастических процессов : учеб. метод. пособие / Н. В. Чигиринская, Ю. Л. Чигиринский, А. С. Горобцов ; ВолгГТУ, Волгоград, 2019. – 108 с. ISBN 978-5-9948-3496-1
5. Справочник технолога / под общей ред. А. Г. Сулова. – М. : Инновационное машиностроение, 2019. – 800 с. ISBN 978-5-907104-23-5
6. Справочник технолога-машиностроителя. В 2 т. Т. 2 / под ред. А. Г. Косиловой и Р. К. Мещерякова. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1985. 496 с., ил.
7. Металлорежущий инструмент Korloy 2018-2019 : каталог инструмента / компания Korloy ; Институт Cheongju, Chungcheongbuk-do, 2018. – 1175 с.

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

УДК 631.589.2

DOI: 10.35211/1990-5297-2025-3-298-38-40

И. В. Александров, И. С. Алексеев, И. В. Волков, А. М. Макаров

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ МИКРОКЛИМАТА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ УСТАНОВКИ АЭРОПОННОГО ВЫРАЩИВАНИЯ РАСТЕНИЙ

Волгоградский государственный технический университет

E-mail: koln4304@gmail.com, alexivn01@gmail.com,
viv.vstu@gmail.com, amm34@mail.ru

Проведено исследование основных параметров микроклимата, а именно совокупность условий, которые влияют на рост и развитие растений в автоматизированной установке аэропонного выращивания. Представлено описание основных параметров микроклимата, описаны основные способы распыления жидкости, представлена схема процесса распыления, а также математическое описание данного процесса.

Ключевые слова: аэропонная установка, автоматизация, управление, микроклимат, распыление, питательный раствор

I. V. Alexandrov, I. S. Alekseev, I. V. Volkov, A. M. Makarov

INVESTIGATION OF MICROCLIMATE PARAMETERS OF AN AUTOMATED AEROPONIC PLANT GROWING FACILITY

Volgograd State Technical University

The main parameters of the microclimate have been studied, namely, the set of conditions that affect the growth and development of plants in an automated aeroponic cultivation unit. The main parameters of the microclimate are described, the main methods of liquid spraying are described, the scheme of the spraying process is presented, as well as a mathematical description of this process.

Keywords: aeroponic device, automation, control, microclimate, spraying, nutrient solution

Аэропоника – метод выращивания растений без почвы, при котором корни увлажняются питательным аэрозолем, что оптимизирует потребление воды и питательных веществ. Микроклимат влияет на продуктивность аэропоники: температура, влажность, CO_2 и освещенность обеспечивают фотосинтез и транспирацию. Отклонения от нормы вызывают стресс у растений, снижая урожайность, поэтому автоматизированный контроль важен.

Основные параметры микроклимата в аэропонике включают:

1. Температура – поддерживает оптимальные условия для метаболизма растений.
2. Влажность – влияет на транспирацию и предотвращает пересыхание корней.

3. Концентрация углекислого газа (CO_2) – стимулирует фотосинтез и ускоряет рост.

4. Освещенность – определяет интенсивность фотосинтетических процессов.

5. Скорость потока воздуха – обеспечивает вентиляцию, предотвращая застой и перегрев.

Эти параметры должны быть строго контролируемыми для достижения максимальной продуктивности растений.

Температура является одним из основных параметров, влияющих на рост и развитие растений. Температура воздуха должна быть 20–26 °C для большинства культур. Температура раствора 18–22 °C для предотвращения перегрева корней и поддержания оптимальной доступности кислорода в растворе. Слишком теп-

лый питательный раствор подходит не для всех культур, часто вызывает стресс и перегрев растений, увядание листьев, сброс плодов, усиленное размножение грибов, бактерий и насекомых-вредителей. При температуре раствора выше +22 °С в воде уровень кислорода падает ниже 8 % и начинается процесс испарения раствора, что приводит к увеличению концентрации питательных веществ.

Перегрев устраняют чиллеры и охладители.

Холодный раствор (<18 °С) замедляет рост и ухудшает усвоение питательных веществ.

Для решения проблемы используют утеплители труб и резервуаров, электрические нагреватели, газовые котлы и теплообменники [1].

Испарение воды из корней может быть рассчитано по формуле:

$$E = k \cdot (T_a - T_r),$$

где E – скорость испарения воды, T_a – температура воздуха, T_r – температура раствора, k – коэффициент, зависящий от влажности воздуха и характеристик корней.

Эта формула демонстрирует, как разница температур между воздухом и раствором влияет на испарение воды с корней. Например, при увеличении разницы ($T_a - T_r$) испарение усиливается, что требует усиленного контроля влажности и регулярного увлажнения корней.

Выделяют следующие способы распыления жидкости (рис. 1): гидравлическое, механическое, пневматическое, пульсационное, ультразвуковое и электрическое распыление. Для механического распыления применяется струйная форсунка, которая преобразует жидкую струю в мелкие капли, обеспечивая эффективное распыление.

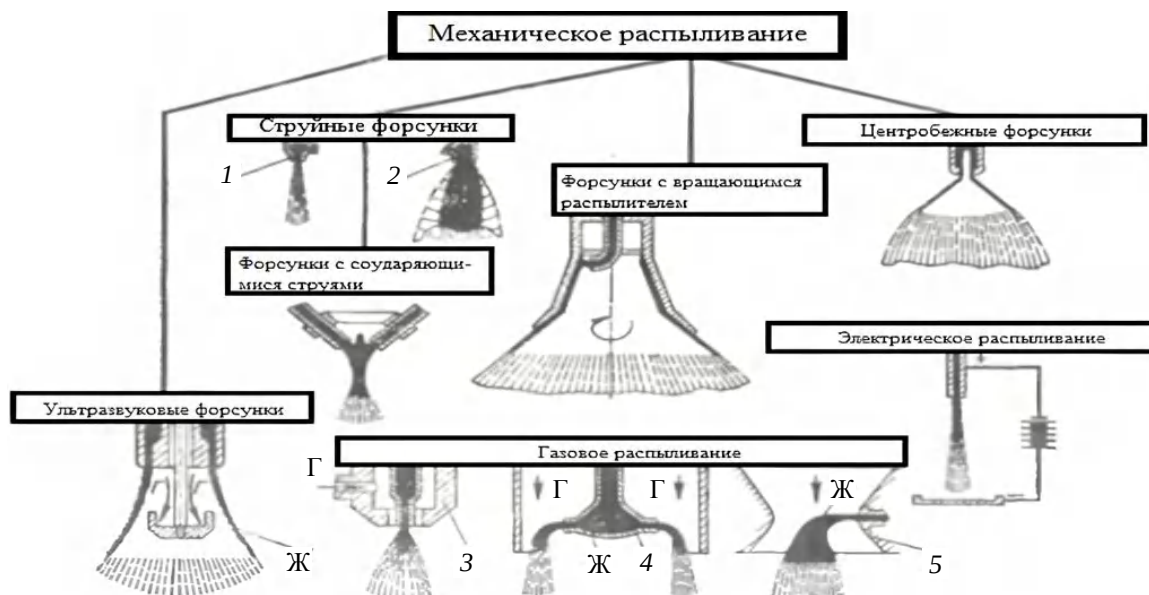


Рис. 1. Классификация способов распыления:
1 – цилиндрическое сопло; 2 – щелевое сопло; 3 – распылитель при соосных потоках жидкостей и газа; 4 и 5 – распылители при подаче жидкости под прямым углом к воздушному потоку; Г – газ; Ж – жидкость

Распыление (рис. 2) происходит, когда струя жидкости разбивается капли. Идеальный спрей состоит из капель одинакового диаметра. Методы распыления можно разделить на гидравлическое распыление и пневматическое распыление. В зависимости от конструкции форсунки или конструкции выходного отверстия форсунки получают различные формы распыления.

При гидравлическом распылении давление нагнетания разгоняет жидкость, превращая ее в капли. Проходя через распылительное устройство, поток жидкой фазы приобретает высокую скорость и преобразуется в форму, способст-

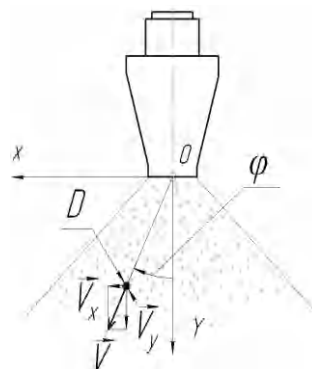


Рис. 2. Расчетная схема процесса распыления жидкости

вующую быстрому и эффективному распаду. В струйных форсунках жидкость аэродинамически разбивается на капли.

В случае образования дисперсной системы потока капель фазовый объем задается совокупностью составляющих случайной скорости центра масс капли v_x , v_y и ее диаметра D , т. е. выделенному набору переменных, характеризующих механизм образования разреженного факела.

$$d\Gamma = dv dD. \quad (2)$$

Согласно исследованию В. А. Бородин [5], распределение числа частиц dN в элементе фазового объема экспоненциально убывает в зависимости от стохастической энергии частицы E :

$$dN = A \exp(-E / E_0) d\Gamma, \quad (3)$$

В случае образования разреженного потока капель стохастическую энергию представляют в виде трех составляющих – кинетической, поверхностной и энергии пульсационного движения, связанной с расширением потока.

$$E = \frac{mv_y^2}{2} + \pi D^2 \sigma + \frac{mv_y^2 \tan^2(\varphi)}{2}, \quad (4)$$

где φ – угол рассеивания частиц; σ – коэффициент поверхностного натяжения, $\sigma = 0,073$ Н/м (для воды при $0 \leq T \leq 20$ °С).

Нормировочное соотношение

$$N = \int_{\Gamma} dN \quad (5)$$

соответствует балансу массы в системе струя-поток и позволяет определить свободный параметр распределения A в выражении (3).

Экспериментальные исследования показывают, что распадающийся Факел жидкости распадается на капли разного размера, дисперсность оценивают функциями распределения.

Согласно выбранному распределению числа частиц в элементе фазового объема $d\Gamma$, можно получить дифференциальную функцию распределения элементов потока жидкости по углу рассеивания в фазовом объеме:

$$d\Gamma' = dv dD. \quad (6)$$

Дифференциальные функции распределения элементов потока по углам рассеивания φ задаются выражением:

$$f(\varphi) = \frac{1}{N} \cdot \frac{dN}{d\varphi}. \quad (7)$$

Параметр E_0 , соответствующий обобщенной мере энергии потока образующихся капель в выражении (3), можно найти из уравнения энергетического баланса, составленного для момента выхода частиц из сопла форсунки:

$$E = E_{\text{ст}}. \quad (8)$$

Здесь $E_{\text{ст}}$ – энергия струи жидкости движущейся в сопле форсунки, E – энергия образованного разреженного потока капель из (3).

Уравнение энергетического баланса в элементе фазового объема будет иметь вид:

$$Nm v_{\text{ст}}^2 = \int_{\Gamma} (mv_y^2 + \pi D^2 \sigma + mv_y^2 \frac{\tan^2(\varphi)}{2}) dN. \quad (9)$$

При сравнении экспериментальных и расчетных данных незначительное расхождение теории с экспериментом объясняется тем, что опытные данные получены на некотором удалении от форсунки, а выражение (4) отражает распределение, описывающее систему капель в момент их образования. Поэтому различие этих распределений указывает на то, что в процессе движения факела происходит влияние турбулентных воздушных потоков. Причем сопоставление теоретического и опытного распределений позволяет количественно и качественно оценить важность указанного процесса. Зависимость $f(\varphi)$ в дальнейшем может быть использована при создании инженерных методов расчета аппаратов, работающих на принципе распыления жидких сред, в том числе форсунок.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Агро-эксим. Поддержание температуры раствора при гидропонном способе выращивания // Агро-эксим : [сайт]. – URL: <https://agro-exim.com/ru/news/podderzhanie-temperatury-rastvora-pri-gidropomnom-sposobe-vyrashivaniya/> (дата обращения: 16.11.2024).
2. Пат. RU 2 038 006 C1, МПК A01G 31/02. Растворный узел для приготовления и подачи питательного раствора / Сотников А. Л., Липницкий Л. А., Лубанов А. Г.; заявитель и патентообладатель Белорусский аграрный технический университет. – № 502840/15; заявл. 24.02.1992; опубл. 27.06.1995.
3. Павлов, А. В. Экспериментальное исследование работ жидкостно-газового эжектора / А. В. Павлов, С. В. Кац // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 1 (104) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2013. – С. 5–8.
4. Волков, И. В. Бесконтактное измерение малых расходов жидкости / Всероссийский научно-исследовательский институт метрологической службы (Москва) / И. В. Волков, В. П. Заярный, А. М. Макаров, Н. В. Кобзев // Измерительная техника. – 2014. – № 7. – С. 35–37.
5. Бородин, А. В. Барисинтез многомерного изоспектрального уравнения Шредингера / А. В. Бородин // Математика и естественные науки. Теория и практика : межвуз. сб. науч. тр. – 2019. – Т. 14. – С. 6–22. – [Электронный ресурс]. – URL: <https://elibrary.ru/> (дата обращения: 17.11.2024).
6. Пат. RU 143696 U1, МПК A01G 31/02. Шлюзовая аэропонная колонна / Волков И. В., Макаров А. М., Василькова Л. А.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Волгоградский государственный технический университет» (ВолгГТУ). – № 2014105026/13; заявл. 11.02.2014; опубл. 27.07.2014.

УДК 621.3.025.3/621.3.024.2

DOI: 10.35211/1990-5297-2025-3-298-41-44

*И. А. Генералов, А. В. Дроботов, А. А. Кузнецов***ИССЛЕДОВАНИЕ ТОКА, ГЕНЕРИРУЕМОГО БЕСКОЛЛЕКТОРНЫМ ДВИГАТЕЛЕМ,
НА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКЕ*****Волгоградский государственный технический университет**E-mail: IvanGeneral2003@gmail.com, alexey.drobotov@gmail.com,
alexsei2003@gmail.com

Разработана экспериментальная установка для исследования тока, генерируемого бесколлекторным электродвигателем малой массы, часто применяемым в мультироторных летательных аппаратах, в режиме генератора. Описана методика проведения экспериментов, представлены результаты измерений и форма сигнала, полученная с помощью осциллографа. Сформулированы рекомендации по улучшению характеристик генерируемого тока.

Ключевые слова: генератор, выпрямитель тока, стабилизатор

*I. A. Generalov, A. V. Drobotov, A. A. Kuznetsov***INVESTIGATION OF THE CURRENT, GENERATED BY
A COLLECTORLESS MOTOR, ON AN EXPERIMENTAL STEND****Volgograd State Technical University**

An experimental stand has been developed to study the current generated by a low-mass brushless electric motor, often used in multirotor aircraft, in the generator mode. The method of conducting experiments is described, the measurement results and the waveform obtained using an oscilloscope are presented. Recommendations for improving the characteristics of the generated current are formulated.

Keywords: generator, current rectifier, voltage stabilizer

Современные технологии беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) активно развиваются, открывая новые возможности в области аэрофотосъемки, доставки и мониторинга. Одним из ключевых элементов БПЛА является бесколлекторный двигатель (БКД), который нашел широкое применение в авиамоделировании благодаря своей высокой эффективности, надежности и компактности. Однако потенциал бесколлекторных двигателей не ограничивается их использованием в качестве приводов винтов БПЛА. Их применение возможно в качестве малогабаритного генератора электрического тока, что открывает перспективы для создания легких автономных источников энергии. Благодаря своей конструкции, включающей постоянные магниты и трехфазную обмотку, БКД способен преобразовывать механическую энергию вращения в электрическую. Однако для эффективного использования БКД в качестве генератора требуется изучение его характеристик, включая анализ выходного напряжения, зависимости коэффициента полезного действия (КПД) от частоты вращения, а также разработ-

ка методов управления и стабилизации генерируемого тока.

Ранее в работе [2] была предложена схема малогабаритного источника энергии, в котором роль генератора выполняет бесколлекторный двигатель. Он на выходе выдает переменный ток на каждом из трех контактов, который для питания мобильного потребителя необходимо преобразовать в постоянное напряжение. Для выпрямления переменного тока предложено использовать трехфазный выпрямитель Ларионова. Используя исследования, приведенные в статье [4], для определения токов и напряжений в системе можно применять схему, показанную на рис. 1.

Схему можно рассматривать как состоящую из двух трехфазных нулевых схем выпрямления. Вентили В1, В3, В5 образуют катодную группу, В2, В4, В6 – анодную. В катодной группе в любой момент времени работает один из вентилях, тот, в фазе которого напряжение наибольшее. Потенциал ϕ_m на выходе этой группы равен верхней огибающей кривой фазных напряжений (рис. 2) вторичной обмотки трансформатора.

© Генералов И. А., Дроботов А. В., Кузнецов А. А., 2025.

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда и администрации Волгоградской области № 24-29-20242, <https://rscf.ru/project/24-29-20242/>.

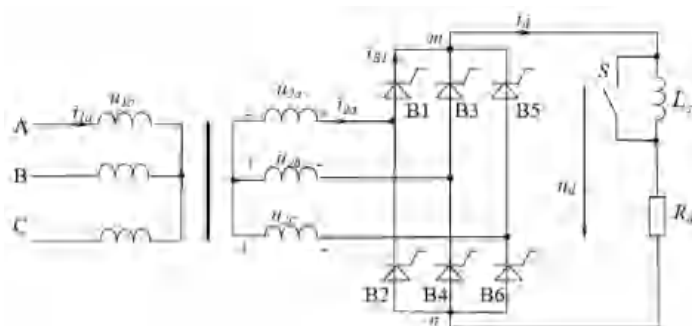


Рис. 1. Шестипульсовая система выпрямления тока

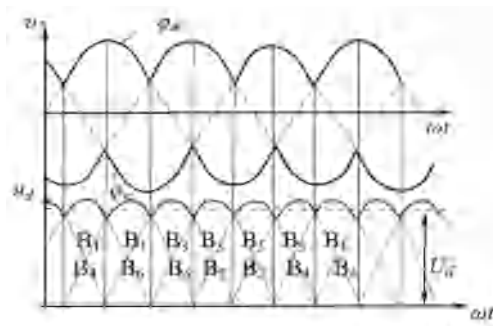


Рис. 2. Изменение напряжения на нагрузке

Исходя из данных статей [3, 4] принципиальную схему установки можно изобразить следующим образом (рис. 3).

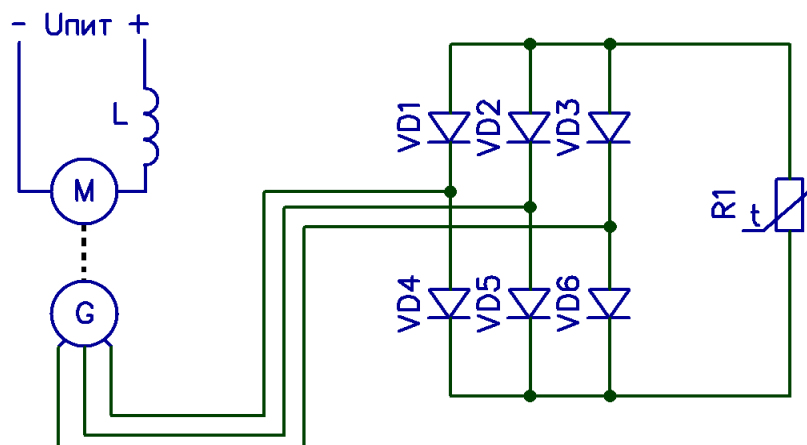


Рис. 3. Принципиальная схема экспериментальной установки

Для исследования формы сигнала генерируемого тока создана на экспериментальная установка, показанная на рис. 4. Она состоит из источника питания 1, который подключен к двигателю постоянного тока (далее ДПТ) 2.

ДПТ через соединительную муфту 4 соединен с бесколлекторным двигателем 3 (далее генератор). Три фазы генератора подключены ко входу выпрямителя 5. К выходу выпрямителя подключен нагревательный элемент 6.

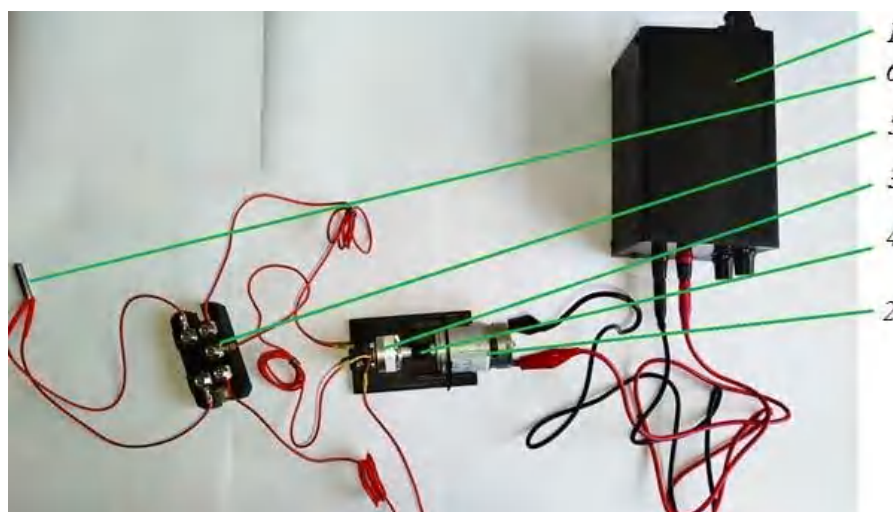


Рис. 4. Экспериментальная установка

Установка работает следующим образом. При включении источника питания 1 подается напряжение на ДПТ 2. Крутящий момент ротора ДПТ передается через соединительную муфту 4 на вал ротора генератора 3. При вращении ротора генератора вырабатывается переменный ток, который проходит через выпрямитель тока 5 и поступает на нагревательный элемент 6.

Для того, чтобы снять показания и осциллограмму одной из фаз генератора был использован низкоомный резистор, параллельно к которому подключен осциллограф (рис 5).

Полученная осциллограмма переменного тока (рис. 6) показывает синусоидальную фор-

му сигнала со «ступеньками». Это может быть из-за того, что в бесколлекторных моторах используются постоянные магниты на роторе и катушки на статоре. При вращении ротора магнитное поле пересекает катушки, создавая ЭДС (электродвижущую силу). Однако из-за дискретного расположения катушек и магнитов форма сигнала может быть не идеально синусоидальной, а иметь ступенчатый характер. Также на графике довольно четко видны перепады напряжения в начале каждой ступеньки. Это может быть связано с переходными процессами при переключении фаз.

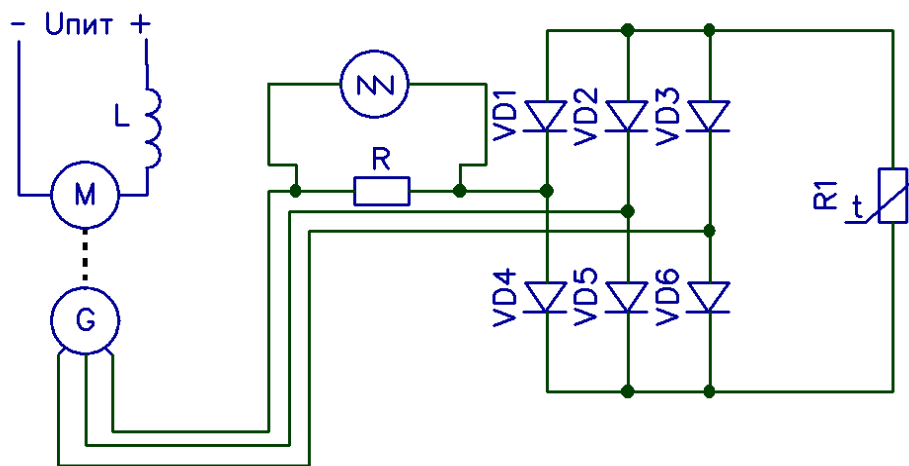


Рис. 5. Схема установки для измерения напряжения на выходе генератора



Рис. 6. Осциллограмма одной из фаз генератора

Для того, чтобы снять показания и осциллограмму выпрямленного тока генератора, был использован маломощный резистор на выходе

выпрямителя, параллельно к которому подключен осциллограф (рис. 7).

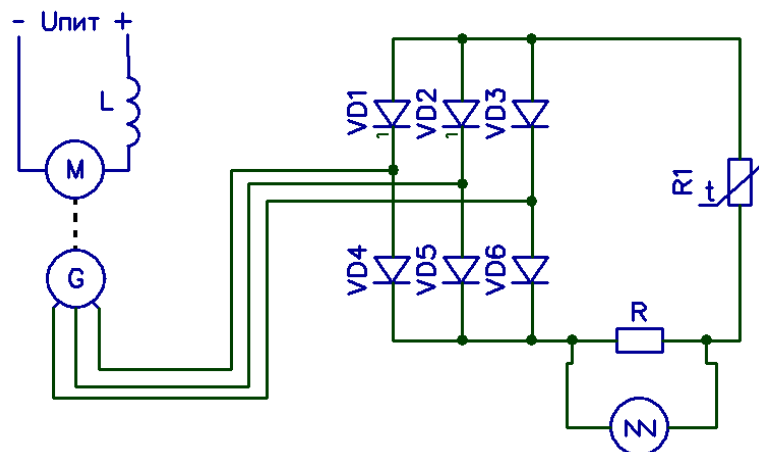


Рис. 7. Схема установки для измерения напряжения на выходе выпрямителя

Полученная осциллограмма переменного тока (рис. 8) показывает пилообразную форму изменения сигнала. Это говорит о том, что ток

имеет некоторые колебания, хотя их амплитуда небольшая.

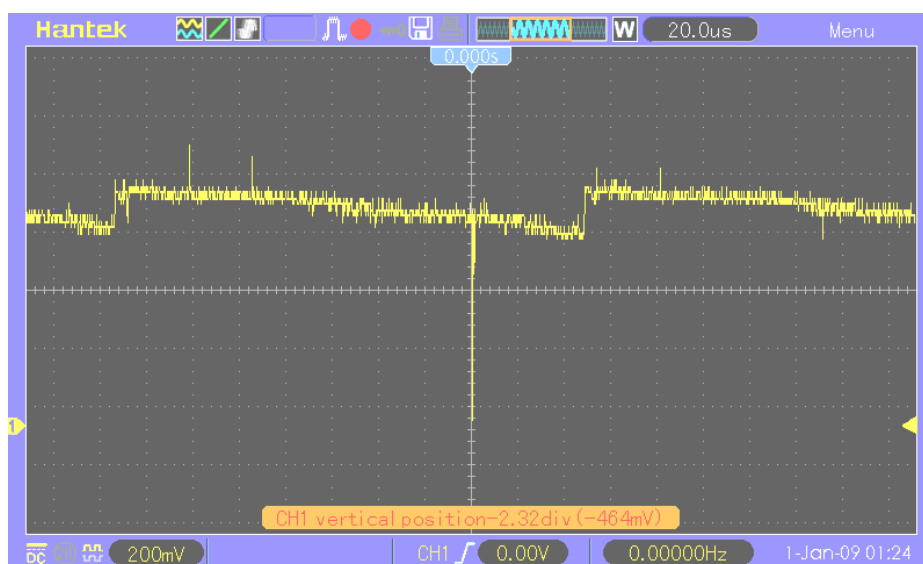


Рис. 8. Осциллограмма на выходе выпрямителя тока

Для того, чтобы избавиться от гармоник тока можно использовать LC-фильтр или на выходе выпрямителя стабилизатор напряжения [1].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Авторское свидетельство № 1198491 А1 СССР, МПК G05F 1/569. Стабилизатор постоянного напряжения с защитой по току и по минимальному входному напряжению ; № 3741811 ; заявл. 27.02.1984 ; опубл. 15.12.1985 / Вартапетов Э. А., Маранджян А. М., Гамбарян М. А. [и др.] ; заявитель Ереванский научно-исследовательский проектный институт автоматизированных систем управления городом. – EDN MNBULK.
2. Генералов, И. А. Система управления малогабаритным генератором для подзарядки аккумуляторов / И. А. Генералов, А. А. Курилова // Известия ВолгГТУ :

научный журнал № 1 (296) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2025. – (Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении». – С. 62–65. – DOI: 10.35211/1990-5297-2025-1-296-62-65.

3. Емельянов, А. Н. Экспериментальный стенд для исследования мощности бесколлекторного двигателя в режиме генератора / А. Н. Емельянов, О. П. Батку, Ю. В. Огородникова // Инновационное развитие науки и образования : сб. ст. VI Междунар. науч.-практ. конф. В 2 ч., Пенза, 12 июня 2019 года / отв. ред. Г. Ю. Гуляев. – Том 1. – Пенза : Наука и Просвещение (ИП Гуляев Г. Ю.), 2019. – С. 44–48. – EDN ZRSZBZ.

4. Шарипов, Л. А. Исследование трехфазного выпрямителя тока, применяемого для управления электрическими двигателями постоянного тока / Л. А. Шарипов // Перспективные материалы науки, технологий и производства : сб. науч. ст. Междунар. науч.-практ. конф., Курск, 24 мая 2022 года. – Курск : Юго-Западный государственный университет, 2022. – С. 338–342. – EDN IWURZC.

УДК 66.021.3

DOI: 10.35211/1990-5297-2025-3-298-45-47

*А. Б. Голованчиков¹, О. А. Залипаева^{1, 2}, П. П. Залипаев¹, С. Г. Поступаева¹***РЕГУЛИРУЕМАЯ УКЛАДКА НАСАДКИ В МАССООБМЕННОЙ КОЛОННЕ
ДЛЯ ЗАДАНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА**¹Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ)²Волжский политехнический институт (филиал) ВолгГТУ

E-mail: a.b.golovanchikov@mail.ru, zalipaevaolga@yandex.ru,

zalipaevpavel@mail.ru, posvetlana@mail.ru

Предлагается регулируемая упорядоченная укладка элементов насадки в массообменном вертикальном аппарате. Рассматривается плотная и с большой пористостью укладка колец Рашига в массообменной колонне. Приводятся теоретически полученные зависимости для определения удельной поверхности и пористости рассматриваемых способов укладки элементов насадки. Описывается преимущество расчета порозности и удельной поверхности по полученным зависимостям в сравнении с эмпирическими справочными значениями. Даются рекомендации по применению предлагаемых способов укладки элементов насадки с учетом физико-химических характеристик контактируемых сред и технологических условий протекания массообменного процесса.

Ключевые слова: массообменная колонна, укладка насадки, кольца Рашига, порозность, удельная поверхность

*A. B. Golovanchikov¹, O. A. Zalipaeva^{1, 2}, P. P. Zalipae¹, S. G. Postupaeva¹***ADJUSTABLE PACKING IN A MASS TRANSFER
COLUMN FOR GIVEN PROCESS PARAMETERS**¹Volgograd State Technical University (VSTU)²Volzhsky Polytechnic Institute(branch) VSTU

The article proposes a controlled ordered packing of packing elements in a vertical mass-exchange apparatus. The dense and highly porous packing of Raschig rings in a mass-exchange column is considered. Theoretically obtained dependencies for determining the specific surface and porosity of the considered packing element packing methods are presented. The advantage of calculating the porosity and specific surface using the obtained dependencies is described in comparison with empirical reference values. Recommendations are given for using the proposed packing element packing methods taking into account the physicochemical characteristics of the contacting media and the technological conditions of the mass-exchange process.

Keywords: mass transfer column, packing arrangement, Raschig rings, porosity, specific surface area

Массообменные аппараты применяются в химической, нефтехимической, газоперерабатывающей, пищевой и других отраслях промышленности для проведения процессов абсорбции, экстракции, десорбции, ректификации [1–4]. Эффективность этих процессов во многом зависит от конструктивных особенностей аппарата и применяемых в нем контактных устройств [4, 5]. Наиболее распространены вертикальные массообменные колонные аппараты, так как они универсальны, компактны и эффективны. Горизонтальные аппараты могут использоваться в процессах с низкой интенсивностью массопередачи, в помещениях ограниченной высоты, а также при специфических технологических и экономических требованиях. В зависимости от конструкции и принципа работы вертикальные массообменные колонны

делятся на тарельчатые и насадочные. Благодаря возможности работы с агрессивными средами и простой конструкции насадочные аппараты используются во многих массообменных процессах, не требующих локального отвода тепла. Вертикальные колонные аппараты заполняются насадкой – твердыми телами различной формы, которые увеличивают поверхность контактируемых фаз.

Конструкция насадочных тел и способ укладки их в колонну во многом определяет эффективность массообменного процесса. Упорядоченная укладка насадки предполагает размещение элементов насадки в строгом геометрическом порядке, что позволяет минимизировать неравномерность распределения контактируемых сред, а также снизить пристеночный эффект [6]. Наиболее распространенные типы

элементов насадки – кольца Рашига. Они имеют большую площадь поверхности на единицу объема для эффективной массопередачи, просты в изготовлении. Кольца Рашига удобны в эксплуатации и обслуживании.

В работе предлагается проводить регулируемую упорядоченную вертикальную укладку колец Рашига в колонном аппарате в зависимости от физико-химических и технологических параметров процесса.

Для повышения эффективности массопередачи незагрязненных сред рекомендуется применять упорядоченную укладку колец Рашига по шестиугольникам вокруг центральных колец со смещением последующего ряда относительно предыдущего. Такая плотная укладка элементов насадки уменьшает ее порозность, увеличивая при этом удельную поверхность. Для определения удельной поверхности уложенных по шестиугольнику колец Рашига предлагается теоретически полученная формула, которая с достаточной точностью позволяет определять этот параметр, не прибегая к справочным и экспериментальным данным

$$\sigma_1 = \frac{4\pi}{\sqrt{3}D} \left[1 - \left(\frac{\delta}{D} \right)^2 \right], \quad (1)$$

где δ – толщина стенки кольца Рашига, мм; D – внешний диаметр кольца Рашига, равный его высоте, мм.

Порозность при рассматриваемой упорядоченной укладке колец Рашига по шестиугольникам вокруг центральных колец уменьшается

по сравнению с порозностью хаотично уложенной насадки и определяется также теоретически по формуле:

$$\varepsilon_1 = 1 - \frac{2\pi\delta(D-\delta)}{\sqrt{3}D^3}. \quad (2)$$

Для контактируемых сред массообменного процесса, содержащих эмульсии или суспензии, предлагается неплотная укладка колец Рашига по четырехугольникам вокруг центральных колец. Такая укладка может быть рекомендована и для сред, в которых нежелательно засыпать навалом элементы насадки из-за значительного гидравлического сопротивления.

При укладке колец Рашига по четырехугольнику вокруг центрального кольца удельную поверхность насадки предлагается определять по полученной теоретической зависимости

$$\sigma_2 = \frac{2\pi}{D} \left[1 - \left(\frac{\delta}{D} \right)^2 \right]. \quad (3)$$

Порозность при рассматриваемой укладке определяется с достаточной точностью по теоретически полученной формуле

$$\varepsilon_2 = 1 - \frac{\pi\delta(D-\delta)}{D^3}. \quad (4)$$

В таблице представлены сравнительные характеристики полученных значений удельной поверхности и порозности при рассматриваемых упорядоченных укладках колец Рашига со справочными значениями, приведенными в литературе [7] для хаотичной укладки колец Рашига (в навал).

Сравнительные характеристики значений удельной поверхности и порозности для хаотичной укладки колец Рашига (в навал)

Стандартные размеры колец Рашига	Расчетные значения по формулам (1) и (2)		Расчетные значения по формулам (3) и (4)		Справочные значения [7]	
	σ_1	ε_1	σ_2	ε_2	σ_c	ε_c
38×38×4,4	188	0,629	163	0,678	180	0,63
50×50×4,4	144	0,709	124	0,747	141	0,69
50×50×5	144	0,674	124	0,717	110	0,72
75×75×9,5	95	0,600	82	0,653	92	0,61
80×80×8	90	0,674	78	0,717	80	0,72
100×100×10	72	0,674	62	0,717	60	0,72
100×100×12,7	71	0,600	62	0,651	69	0,62
125×125×14,3	57	0,630	49	0,681	52	0,66
150×150×16	48	0,650	41	0,700	46	0,67

Как видно из приведенной таблицы, упорядоченная вертикальная укладка элементов насадки в колонный аппарат позволяет регулировать параметры массообменного процесса

с учетом условий его проведения и характеристик контактируемых сред. В справочных данных, приведенных в литературе, как правило, для определения порозности и удельной по-

верхности хаотично уложенной насадки используются значения, полученные экспериментальным путем. Предлагаемые теоретические зависимости для определения порозности и удельной поверхности по известным геометрическим параметрам колец Рашига позволяют с достаточной точностью определять порозность и удельную поверхность рассматриваемых способов укладки элементов насадки, не прибегая к эмпирическим зависимостям.

Упорядоченная укладка колец Рашига в массообменный вертикальный аппарат может осуществляться скрепленными блоками, что позволяет использовать этот способ укладки как в малотоннажных аппаратах, так и в крупногабаритных колоннах.

Приведенные способы вертикальной укладки элементов насадки по шестиугольникам вокруг центральных колец рекомендуется применять к процессам с высокой интенсивностью массопередачи и высокими требованиями к чистоте целевого продукта. Укладка колец Рашига по четырехугольникам вокруг центральных колец может использоваться в массообменных процессах с загрязненными средами, что позволяет увеличить рабочий цикл массообменной колонны.

Регулируемая укладка элементов насадки дает возможность достаточно точно теоретически

определять значения порозности и удельной поверхности, способствует равномерности распределения контактируемых сред, позволяет оптимизировать параметры массообменного процесса с учетом его специфических характеристик.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Касаткин, А. Г. Основные процессы и аппараты химической технологии : учеб. для студ. вузов / А. Г. Касаткин [и др.]. – М. : Альянс, 2008. – 784с.
2. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии : учеб. пособие для студ. вузов / К. Ф. Павлов, П. Г. Романков, А. А. Носков ; под. ред. П. Г. Романкова. – 10-е изд., перераб. и доп. – М. : Альянс, 2013. – 576 с.
3. Расчет и проектирование массообменных аппаратов : учеб. пособие / под. ред. А. Н. Острикова. – СПб. : Лань, 2015. – 352 с.
4. Allmen Erwin von. Economics Are Basic for Plant Location. – Chemical Engineering Progress, LVI, 1960. – 485p.
5. Calculations of the Amplitude of Vibrations in Resonant and Near-Resonant Processes of a Vibrating Centrifugal Separator / Golovanchikov, A.B., Zalipaeva, O.A., Merentsov, N.A., Raeva, Y.N. // Optics and Spectroscopy. – 2023. – Vol. 131, Issue 12 (December). – P. 1185-1189.
6. Теоретическая оценка порозности колец Рашига в пристенной области насадочной колонны / А. Б. Голованчиков, Н. А. Меренцов, М. В. Топилин, П. П. Залипаев // Теоретические основы химической технологии. – 2024. – № 4. – С. 486–490.
7. Сокол, Б. А. Насадки массообменных колонн / Б. А. Сокол, А. К. Чернышов, Д. А. Баранов. – Москва : Галилея-принт, 2008. – 358 с.

УДК 654.071.3

DOI: 10.35211/1990-5297-2025-3-298-47-50

Д. В. Козорозов, В. Г. Барabanov

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НОЖНИЦ НА ПРОЦЕСС РЕЗКИ

Волгоградский государственный технический университет

E-mail: dan4ikan@gmail.com, vbarabanov@vstu.ru

В работе проведено исследование параметров ножниц, влияющих на режимы резки, таких как угол реза, боковой зазор и затупление ножей. Эти параметры существенно определяют как качество реза, так и энергозатраты, связанные с процессом. Основное внимание уделяется форме ножей и их конструкции, а также влиянию трения на боковых поверхностях. Подробно рассматривается взаимоотношение угла заострения и усилия реза, а также оптимальные параметры для достижения минимальных энергозатрат и высококачественного реза.

Ключевые слова: ножницы поперечной резки, резка металла

D. V. Kozorozov, V. G. Barabanov

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF THE DESIGN AND TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF SCISSORS ON THE CUTTING PROCESS

Volgograd State Technical University

The article investigates the parameters of scissors that affect the cutting modes, such as the cutting angle, side gap and blunt knives. These parameters significantly determine both the cutting quality and the energy consumption associated with the process. The main focus is on the shape of the knives and their construction, as well as the effect of friction on the side surfaces. The relationship between the sharpening angle and the cutting force, as well as optimal parameters for achieving minimal energy consumption and high-quality cutting, is considered in detail.

Keywords: cross-cutting scissors, metal cutting

Параметры ножниц с катящимся резом (НКР), такие как угол реза, боковой зазор, степень затупления ножей и прочие, влияют на режимы резки, и от них в значительной мере зависят качество реза и энергозатраты. Рассмотрим наиболее ключевые из этих параметров.

Формы ножей. Во время резки на боковых поверхностях ножей возникает трение, которое в некоторых случаях может составлять 8...10 % от общей мощности реза [1]. Это приводит к возникновению складок на разрезаемой поверхности листа. Для уменьшения сопротивления трению между верхним и нижним ножами и материалом в ножах могут выполняться пазы, показанные на рис. 1, д.

При изменении угла заострения β в пределах от 90 до 80 градусов (рис. 1, г) усилие реза уменьшается на 20–25 %. В настоящее время поперечное сечение ножей для ножниц гильотинного типа обычно принимают в форме прямоугольника (заострение 90 градусов), высота которого в 2,5...3 раза больше толщины. Благодаря этому, получаются четыре режущие кромки, и нож реже нуждается в переточке. При использовании дугообразного ножа (рис. 2, а) на участках входа ножа в металл и выхода из него расчетные усилия реза имеют более или менее выраженные пики, превышающие значения, соответствующие участку установившейся обкатки. Это связано с тем, что вначале реза заглубление ножа в металл производится при малых углах.

Углом реза α называется угол наклона верхнего ножа к нижнему (рис. 3). Для НКР, имеющих закругленный нож, за угол реза можно принять угол наклона хорды, соединяющей точку врезания ножа в металл А и точку отрыва металла В, или угол наклона касательной в точке F приложения силы реза $F_{рез}$. Его величина существенно влияет на качество отрезаемых полос. Оптимальным с точки зрения качества считается рез параллельными ножами, при котором лист режется сразу по всей ширине ($\alpha = 0$). При этом не происходит искривления отрезаемого края заготовки, и затраты энергии на рез оказываются минимальными.

Угол реза не должен превышать угол трения между листом и верхним ножом, и поэтому его величина ограничена. Практически, α не принимают свыше 6 градусов, при котором выталкивающее лист из-под ножей горизонтальное усилие $-F_{гор} = F_1 \tan \alpha$ не превышает 11 % от максимального усилия реза $F_{макс}$ [2]. На его величину влияют радиус верхнего ножа R, перекрытие ножей Δ , толщина листа h. С увеличением Δ или h, угол реза возрастает. Влияние угла реза α на главное усилие реза определяется в основном двумя противоположно действующими факторами: с одной стороны, с увеличением угла реза уменьшается поперечное сечение заготовки, находящееся между ножами, что ведет к уменьшению силы реза.

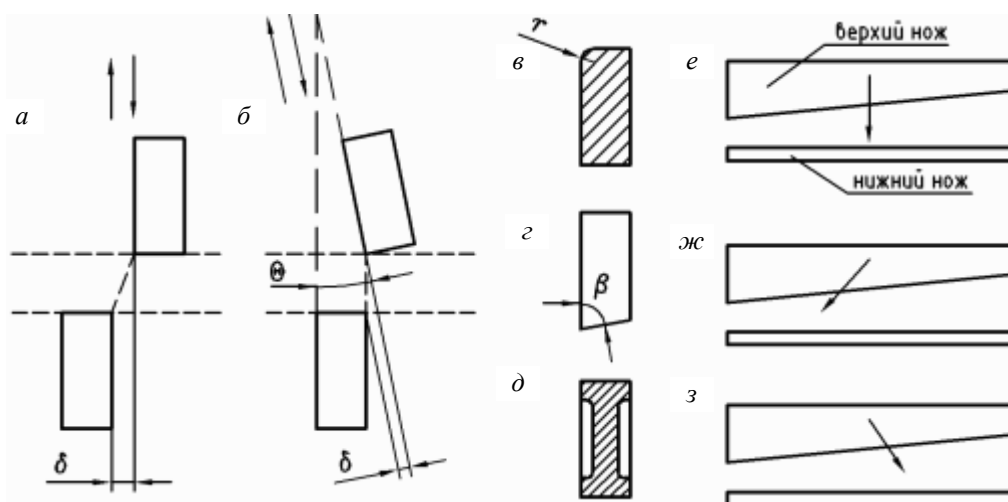


Рис. 1. Боковой зазор между ножами:

а – при параллельном движении верхнего ножа к нижнему; б – при наклонном; в – радиус затупления режущей кромки; г – угол заострения; д – паз для уменьшения силы трения; направление движения гильотинного ножа: е – при вертикальном резе; жс – тянущем; з – толкающем



Рис. 2. Применяемые формы ножей:
 а – дугообразный нож с постоянным радиусом кривизны; б – составленный из трех дуг разного радиуса;
 в – нож, составленный из четырех пластин

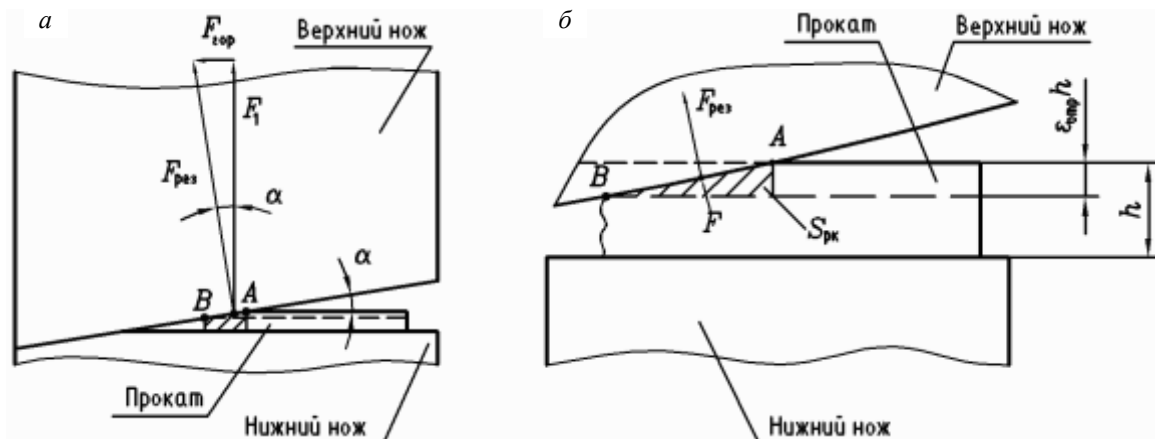


Рис. 3. Угол реза:
 а – гильотинных ножниц; б – ножниц с катящимся резом;
 А – точка врезания; В – точка отрыва металла

С другой стороны, при больших углах реза имеет место большее упрочнение материала, чем при малых, следствием чего должно появиться увеличение сил реза.

С целью уменьшения усилия врезания при резке на НКР листов шириной, меньше максимальной, лист заранее смещают вдоль нижнего ножа в сторону окончания реза. При этом уменьшается режущий клин, что снижает пиковую нагрузку. Однако, следует отметить, что это может использоваться лишь в том случае, когда нож движется только в одном направлении.

Кроме этого, возможны различные варианты уменьшения максимального значения усилия реза с помощью профилировки режущей части ножа. Для этого сокращают площадь среза, оказывающую сопротивление резанию, путем увеличения угла реза α на участках врезания и выхода ножа из металла при данной кинематике ножниц. Радиусы кривизны режущей кромки в зоне врезания должны быть увеличены по сравнению с радиусом основного участка и уменьшены в зоне выхода рис. 2, б. Для исключения пиков нагрузки, возникающих при скачкообразном изменении кривизны режущей кромки.

Конструкция составного ножа содержит державку и четыре ножевых пластины, имею-

щие форму параллелепипедов и образующие ребрами боковых граней режущую кромку в виде ломаной линии рис. 2, в. Пиковую нагрузку можно устранить полностью, если углы реза в начале внедрения и в конце выхода ножа из листа равны и не превышают угол реза при установившемся процессе разделения листа. В данном случае при резке листа максимальной шириной 3450 мм усилие реза уменьшается примерно на 30 % по сравнению с дугообразным ножом.

Степень затупления ножей. Притупление ножей характеризуется радиусом режущей кромки r . Оно оказывает большое влияние на величину полного усилия реза. Затупление ножей приводит к увеличению прочности на срез вследствие большей деформации металла. В результате увеличения силы реза увеличивается также распорная сила $F_{расп}$, благодаря которой стол ножниц и балка ножа прогибаются больше, чем при резе острыми ножами. Это ведет к увеличению бокового зазора между ножами, что, как указывалось раньше, также неблагоприятно сказывается на качестве реза.

Искусственное затупление режущих кромок ножей до радиуса $r = 4$ мм вызывает при разрезании сутунок из стали 20 толщиной 14 мм повышение усилия реза, по сравнению с резанием

острыми ножами, на 60 %. Кроме того, резание сопровождается образованием значительных заусенцев. Стойкость ножей кромкообрезных НКР в зависимости от пропускной способности ножниц составляет 2–3 дня. Не ухудшая значительно поверхности среза разрезаемого металла, можно допускать затупление режущих кромок ножей до

$$r = (0,25 \dots 0,30) \varepsilon_{omp} h,$$

где ε_{omp} – коэффициент относительного отрыва металла; h – толщина разрезаемого листа. Влияние притупления в таком случае должно учитываться увеличением полного усилия реза на 15...20 %. Приведены зависимости увеличения силы реза (в процентах) от толщины и радиуса затупления (рис. 3).

Скорость резки. Во многих источниках указывается на наличие зависимости усилия реза от скорости движения ножа. Вместе с тем, сведений о влиянии скорости движения режущего инструмента на качество кромки и усилие реза в литературе очень мало.

Скорость удара режущего инструмента оказывает сравнительно небольшое влияние при резке мягких и пластичных материалов. Что касается твердых и хрупких материалов, то эксперименты, проводимые на прессах, показали, что при резке образцов на медленно двигающемся гидравлическом прессе необходимое усилие сдвига будет на 15...18 % больше, нежели на механическом прессе с высокой ударной скоростью.

При резании металлов при температурах ниже границы рекристаллизации (составляющей 550...650 °C), не было обнаружено никакого влияния скорости реза $V_{рез}$. Приведена зависимость предела прочности σ_b от скорости деформации для низко-углеродистых сталей (рис. 4) при различных температурах. Из нее видно, что с увеличением температуры уменьшается предел прочности. Средняя скорость деформации определяется выражением

$$u_d = \frac{1}{l} \cdot \frac{dl}{dt},$$

где l – первоначальная длина деформируемого образца; $\frac{dl}{dt}$ – скорость растяжения.

Толщина проката h . При постоянном угле реза α , площадь среза и, таким образом, сила реза, определяются толщиной материала. На одних и тех же ножницах, т. е. при сохране-

нии их конструктивных характеристик, полное усилие реза при разрезании одной и той же марки стали убывает с уменьшением h не пропорционально h_2 , а несколько меньше, и это расхождение особенно увеличивается при малых толщинах разрезаемого металла. Уменьшение толщины вызывает относительное увеличение составляющей полного усилия реза, учитывающей изгиб разрезаемого металла в зоне резания. Кроме того, при резке тонкого проката, величина относительного надреза $\varepsilon_{над}$, учитывающая относительную толщину деформированного («заглаженного») материала до наступления скола, возрастает. По вышеперечисленным причинам удельная энергия $E_{рез}/S_p$, приходящаяся на рез единицы площади разрезаемого металла, с уменьшением толщины возрастает.

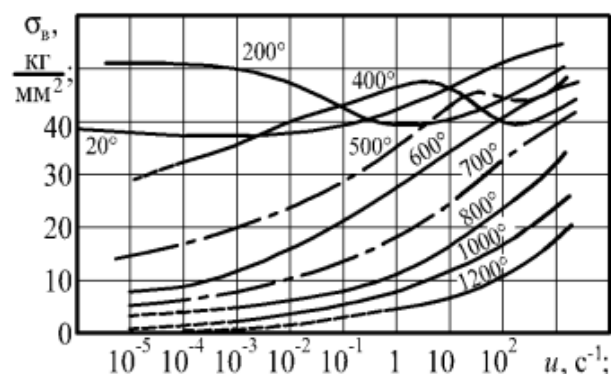


Рис. 4. Влияние скорости деформации и температуры на предел прочности

Анализ существующих механизмов резания и тенденций их развития показывает, что дальнейшее совершенствование механических систем синхронизации движения ножа и систем их управления имеет ряд ограничений, которые не позволяют обеспечить оптимальную траекторию движения ножа.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сафронова, Т. В. Энергосиловые параметры при резке толстолистового проката на ножницах. / Т. В. Сафронова // Теория и технология производства толстого листа. – М. : Металлургия, 1986. – С. 97–92.
2. Машины и агрегаты металлургических заводов : учеб. для студентов металлургических и машиностроительных специальностей вузов: в 3 т. / А. И. Целиков, П. И. Полухин, В. М. Гребеник [и др.]. – 2-е изд., перераб. и доп., стер. – М. : Альянс, 2018. – 576 с.

УДК 004.65

DOI: 10.35211/1990-5297-2025-3-298-51-54

*Н. А. Коробова, Д. В. Козорозов, Е. Г. Крылов, Н. В. Козловцева***РАЗРАБОТКА БАЗЫ ДАННЫХ «ПОКАЗАТЕЛИ СМК
ПРЕДПРИЯТИЯ ХИМИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ
ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО АНАЛИЗА И ОБРАБОТКИ»****Волгоградский государственный технический университет**

E-mail: Ninusha02@mail.ru, dan4ikan@gmail.com,

knva2201@yandex.ru, milly14@rambler.ru

Рассмотрена разработка базы данных для автоматизированного анализа и обработки показателей системы менеджмента качества (СМК) на химическом предприятии АО «Каустик». Создана структурированная база данных с использованием языка Access SQL, которая позволит оперативно собирать, хранить и обрабатывать информацию. В рамках проекта были созданы таблицы, охватывающие различные аспекты работы предприятия.

Ключевые слова: база данных, автоматизация, СМК

*N. A. Korobova, D. V. Kozorozov, E. G. Krylov, N. V. Kozlovtsseva***A DATABASE «INDICATORS OF A CHEMICAL INDUSTRY ENTERPRISE'S QMS
FOR AUTOMATED ANALYSIS AND PROCESSING» DEVELOPMENT****Volgograd State Technical University**

The development of a database for automated analysis and processing of quality management system (QMS) indicators at the chemical enterprise of JSC Kaustic is considered. A structured database has been created using the Access SQL language, which will allow you to quickly collect, store and process information. Within the framework of the project, tables were created covering various aspects of the company's work: types of consumers, consumer data, reasons for complaints, information about technological workshops, employees and manufactured products.

Keywords: database, automation, QMS

В настоящее время развитие химической промышленности РФ направлено на создание комплекса взаимосвязанных технологических переделов (от сырья до готовой продукции) для решения приоритетных задач импортозамещения и укрепления кадрового потенциала. Более 45 % предприятий в 2024 г. обновили стратегии развития в части производственной и инвестиционной политики, импортозамещения, цифровой и технологической активности. Свыше трети (37 %) внедряют технологии, направленные на создание импортозамещающей продукции. Каждое пятое предприятие химической промышленности проводит модернизацию своих производственных мощностей для выпуска соответствующей продукции [1].

На химическом предприятии АО «Каустик» возникла потребность хранения и обработки данных, связанных с работой отдела по менеджменту качества. Количество признанных претензий по вине технологических цехов рассчитывается управлением систем менеджмента (сотрудниками СМК) на основании данных журнала учета претензий суммарно по всем

технологическим цехам [2, 3]. Для решения этой задачи была разработана база данных в MS Access на языке Access SQL.

Для работы с базой данных были созданы таблицы:

- 1) тип потребителя – используется для хранения данных о типах потребителей;
- 2) потребитель – используется для хранения данных о потребителе;
- 3) причина претензии – используется для хранения информации о причинах претензий;
- 4) цех – используется для хранения информации о технологических цехах;
- 5) работники – используется для хранения информации о работниках технологических цехов, которые должны провести работы по устранению неполадок по претензиям;
- 6) продукт – используется для хранения информации о продуктах, которые производят технологические цеха;
- 7) журнал претензий – используется для хранения информации о всех претензиях.

Рассмотрим таблицу «Журнал претензий». Она содержит поля, представленные на рис. 1.

Имя поля	Тип данных	
ID	Числовой	Идентификатор претензии
Дата поступления претензии	Дата и время	
Регистрационный номер	Счетчик	Порядковый номер претензии
ID потребителя	Числовой	
ID продукта	Числовой	
ID причина претензии	Числовой	

Рис. 1. Таблица «Журнал претензий»

После создания таблиц, необходимо указать связи между ними (рис. 2). Из этого рисунка видно, что целостность данных не нарушена и все таблицы связаны друг с другом.

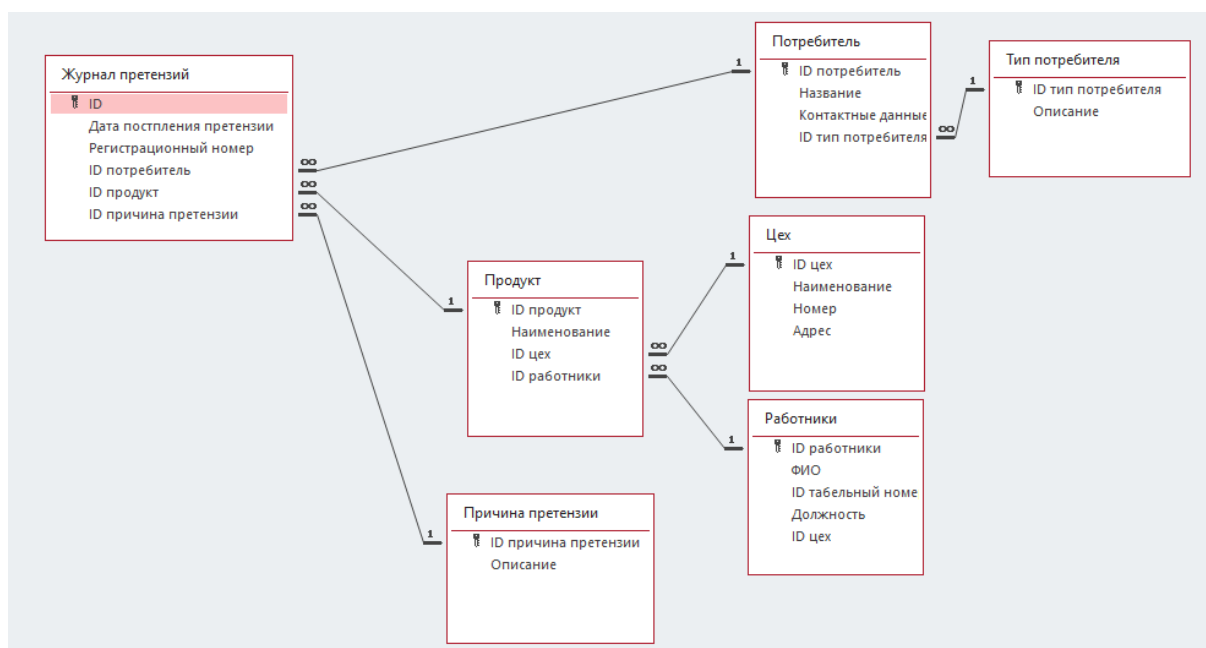


Рис. 2. Схема данных

Далее были заполнены справочные таблицы, представленные на рис. 3–7.

ID тип потребителя ▾	Описание ▾
+	1 Юр. Лицо
+	2 Физ. Лицо

Рис. 3. «Тип потребителя»

ID потребитель ▾	Название ▾	Контактные данные ▾	ID тип потребителя ▾
+	1 ООО "Проктер энд Гэмбл - Новомосковск"		1
+	2 ООО "КДВ Групп"		1
+	3 ООО "Волгоградполимерсбыт"		1
+	4 АО "НГВК"г. Нерюнгри		1
+	5 АО "Волжский Оргсинтез"		1
+	6 ООО "СТЕЛЛАР КОНСТРАКШН"		1
+	7 АО "Белорецкий металлургический комбинат"		1
+	8 Kaustik Europe B.V.	Wal Mar Польша	1
+	9 ОАО "Можелит"		1
+	10 ООО "ЭДИАЛ ПЛАСТ"		1
+	11 ООО "Химинвест"		1
+	12 Kaustik Europe B.V.	Cabopol	1
+	13 П. Морозов		2

Рис. 4. «Потребитель»

ID причина ▾	Описание ▾
+ 1	Доставка
+ 2	Качество продукта
+ 3	Количество (пересортица/недогруз/перегру
+ 4	Разъяснения по продукту
+ 5	Тара/упаковка
+ 6	Другое

Рис. 5. «Причина претензии»

ID цех ▾	Наименова ▾	Номер ▾	Адрес ▾
+ 1	Цех №1	1	ул. 40 лет ВЛКСМ, 57
+ 2	Цех №104	104	ул. 40 лет ВЛКСМ, 57
+ 3	Цех №11	11	ул. 40 лет ВЛКСМ, 57
+ 4	Цех №112	112	ул. 40 лет ВЛКСМ, 57
+ 5	Цех №2	2	ул. 40 лет ВЛКСМ, 57
+ 6	Цех №21	21	ул. 40 лет ВЛКСМ, 57
+ 7	Цех №23	23	ул. 40 лет ВЛКСМ, 57
+ 8	Цех №24	24	ул. 40 лет ВЛКСМ, 57
+ 9	Цех №28	28	ул. 40 лет ВЛКСМ, 57
+ 10	Цех №30	30	ул. 40 лет ВЛКСМ, 57
+ 11	Цех №6	6	ул. 40 лет ВЛКСМ, 57
+ 12	Цех №8	8	ул. 40 лет ВЛКСМ, 57

Рис. 6. «Цех»

ID продукт ▾	Наименование ▾	ID цех ▾	ID работниг ▾
1	Магния хлорид	1	1
2	дез.средство ТМ "Акватикс"	2	2
3	Жидкий хлор	3	3
4	Другое	4	4
5	Магния гидроксид	5	5
6	кислота соляная ингибированная	6	6
7	Подготовка тары	7	7
8	Хлорметил	8	8
9	Гранкаустик	9	9
10	Каустик марки РД	10	10
11	Каустик марки РР	11	11
12	Соль	12	12

Рис. 7. «Продукт»

Для удобства заполнения таблицы «Журнал претензий» была создана форма (рис. 8), в которой специалист по качеству может выбрать подходящие позиции из выпадающего списка с перечнями доступных полей «Название» таблицы «Потребитель», «Описание» таблицы «Причина

претензии» и «Наименование» таблицы «Продукт». «Дата претензии» заполняется вручную.

При нажатии кнопки «Добавить запись в журнал» автоматически создается строка в таблице «Журнал претензий» и вносятся данные в зависимости от выбранных ранее параметров (рис. 9).

Журнал претензий

Потребитель

Причина претензии

Продукт

Дата претензии

[Добавить запись в журнал](#)

Рис. 8. Форма заполнения журнала

ID	Дата поступления претензии	Регистрационный номер	ID потребитель	ID продукт	ID причина
1	17.01.2024	1	2	12	2
2	31.01.2024	2	2	12	4
3	12.02.2024	3	7	6	5
4	28.02.2024	4	12	5	6
5	11.04.2024	5	9	12	2
6	17.04.2024	6	5	11	1
7	18.04.2024	7	4	2	4
8	22.05.2024	8	8	9	5
9	24.06.2024	9	1	8	3
10	28.08.2024	10	3	3	3
11	09.10.2024	11	10	10	1

Рис. 9. «Журнал претензий»

Разработанная структура базы данных позволяет специалистам оперативно находить необходимую информацию о той или иной проблеме, возникающей при производстве заданного вида продукции в определенном цехе предприятия.

Использование предлагаемой базы данных дает возможность:

- 1) повысить скорость учета и анализа претензий, поступающих по качеству продукции;
- 2) сократить временные затраты конечных пользователей;
- 3) автоматизировать работу отдела СМК.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Химическая промышленность: актуальные оценки // Институт статистических исследований и экономики знаний ВШЭ [Электронный ресурс]. – URL: <https://issek.hse.ru/news/956101493.html> (дата обращения 12.12.2024)
2. Коробова, Н. А. Анализ рисков и возможностей на предприятии АО «Каустик» / Н. А. Коробова, Е. А. Богомолова, П. А. Норченко // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 1 (284) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2024. – (Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении»). – С. 11–14. – DOI: 10.35211/1990-5297-2024-1-284-11-14.
3. Коробова, Н. А. Анализ рисков и управление ими на примере химического предприятия АО «Каустик» / Н. А. Коробова // XXVII Региональная конференция молодых ученых и исследователей Волгоградской области (г. Волгоград, 2–15 ноября 2022 г.): сб. матер. конф. / редкол. : С. В. Кузьмин (отв. ред.) [и др.] ; ВолгГТУ. – Волгоград, 2022. – С. 85–87.

УДК 62-791.2

DOI: 10.35211/1990-5297-2025-3-298-55-57

А. А. Кузнецов, А. В. Дроботов, А. А. Курилов

РАЗРАБОТКА УСТРОЙСТВА ДЛЯ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ ПОДТЕКАНИЯ ПЛАСТИКА В FDM АДДИТИВНЫХ УСТАНОВКАХ*

Волгоградский государственный технический университет

E-mail: alexsei2003@gmail.com, alexey.drobotov@gmail.com, aleksandrkurilovd@gmail.com

Предложена автоматическая система для предотвращения подтекания пластика из сопла 3D-принтера во время холостых перемещений. Она основана на перекрытии сопла при падении давления в канале подачи пластика, которое является следствием приостановки подачи материала.

Ключевые слова: 3D-принтер, сопло, филамент

А. А. Kuznetsov, A. V. Drobotov, A. A. Kurilov

DEVELOPMENT OF A DEVICE TO PREVENT PLASTIC LEAKAGE IN FDM ADDITIVE INSTALLATIONS

Volgograd State Technical University

An automatic system is proposed to prevent plastic leakage from the 3D printer nozzle during idle movements. It is based on the closure of the nozzle when the pressure drops in the plastic supply channel, which is a consequence of the suspension of the material supply.

Keywords: 3D printer, nozzle, filament

Технология послойного наплавления *FDM* (*Fused Deposition Modeling*) нашла широкое применение в мелкосерийном производстве, прототипировании и макетировании небольших партий изделий из термопластичных полимеров. Одной из основных проблем при печати данной технологией является подтекание пластика из сопла, что приводит к возникновению «нитей» при свободном перемещении печатающей головки и «капелек» на наружной поверхности деталей, что приводит к ухудшению их внешнего вида.

Способы объемной печати с перекрыванием сопла разрабатывались и изучались многими научными коллективами и компаниями. В исследовании [1] было представлено устройство перекрывающее сопло в трех-сопельной печатающей головке посредством диска, экранирующего нерабочие сопла. В исследовании [2] рассматривается устройство перекрывающее сопло путем перемещения подвижной платформы, которая смещает положения сопел относительно клапана для сопел, запирая отверстия неактивных сопел и открывая отверстие активного сопла. В работе [3] проблема решается путем использования золотника, расположенного с возможностью поворота перпенди-

кулярно продольной оси канала и направляемого через указанный канал. В золотнике в зоне канала выполнено отверстие, выходящее в перепускной канал, который проходит через указанный золотник к перепускной головке. В зависимости от угловых положений золотника пластически деформируемый экструдированный материал может подаваться по канавке в направлении выпускной головки.

Для устранения имеющихся недостатков нами предложено новое техническое решение, схема которого представлена на рис. 1 и заключающееся в следующем. В неактивном состоянии игла перекрывает отверстие сопла, и при

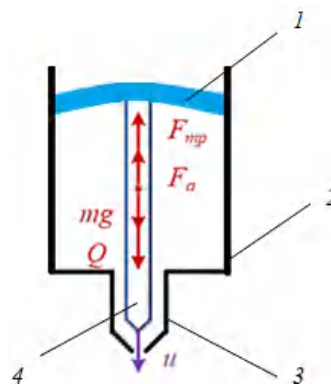


Рис. 1. Расчетная схема движения иглы в расплаве

© Кузнецов А. А., Дроботов А. В., Курилов А. А., 2025.

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда и администрации Волгоградской области № 24-29-20242, <https://rscf.ru/project/24-29-20242/>.

холостом ходе печатающей головки расплав не подается. В момент подачи расплава в корпус печатающей головки внутри создается избыточное давление, которое действует на мембрану, к которой прикреплена игла, и сила, действующая на мембрану, вызывает подъем иглы и освобождение отверстия. Таким образом, подача расплава в область печати восстанавливается в нужный момент. Данное решение применимо и для принтеров с несколькими экструдерами.

На иглу, перемещающуюся в расплаве пластика со скоростью u (рис. 1), действуют четыре силы: сила закрытия Q , приложенная к игле со стороны привода; сила тяжести mg , архимедова сила F_a и сила сопротивления вязкой среды $F_{тр}$.

Описание устройства. В блоке 2 корпуса печатающей головки сделаны отверстия под датчик температуры и нагревательный элемент, так же получены каналы для прохождения по ним расплава пластика. Между корпусом и резьбовой втулкой затягивается мембрана 1. Игла 4, которая перекрывает отверстие в сопле 3 устанавливается в мембрану и жестко затягивается с двух сторон гайками, которые накручиваются на саму иглу, тем самым обеспечивается жесткая связь иглы с мембраной. В резьбовую втулку есть возможность закрутить болт для регулировки хода иглы, это необходимо для печати разными пластиками с разной текучестью.

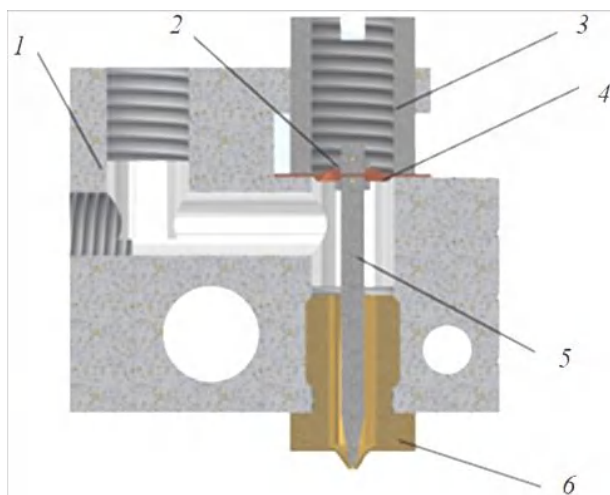


Рис. 2. Вид устройства в разрезе

Описание работы устройства. При поступлении филамента в термобарьер, он расплавляется в каналах внутри корпуса 1, далее расплав поступает в камеру с мембраной 4, которая

прижата к корпусу резьбовой втулкой 3 постепенно создавая на нее давление, при достижении необходимых значений, давление пластика начинает превышать силу упругости мембраны, и игла 5, закрепленная гайками 2, поднимается. Высвобождая отверстие в сопле 6. При холостом перемещении головки 3D принтера давление на мембрану снижается, сила упругости мембраны начинает превышать силу давления на нее, и игла перекрывает отверстие в сопле. Таким образом реализуется функция перекрытия сопла для избегания его подтекания.

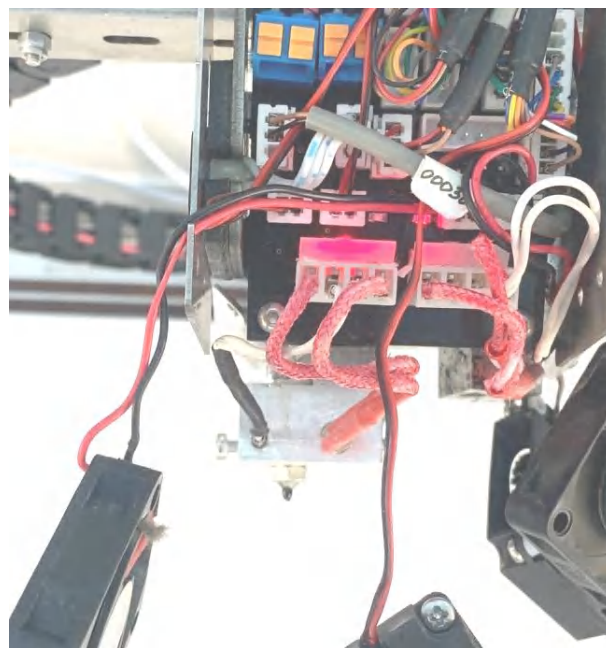


Рис. 3. Устройство в сборе, установленное на принтере

При конструировании изделия нужно было решить проблему с материалом мембраны. Пришлось столкнуться со следующим противоречием: мембрана должна быть упругой, для чего ее следует изготавливать из таких распространенных упругих материалов как термополиуретан (*TPU* или *Flex*). Однако сделать мембрану из таких материалов не представляется возможным, так как температура эксплуатации будет достигать отметку выше 200 °С. В связи с этим было принято решение использовать силиконовый материал с температурой плавления выше 300 °С. Наладить работы с данным материалом удалось следующим образом: фиксация мембраны на игле с помощью двух прижимных гаек с шайбами для предотвращения разрыва материала. Были изготовлены две шайбы из металла для крепления иглы, чтобы снизить давление на мембрану.

Несмотря на то, что разработанное устройство лишено тех недостатков, которые имеют другие устройства автоматического перекрытия сопла, данное устройство нуждается в некоторых доработках, например у мембраны есть сильные ограничения по длине хода, поэтому в дальнейшем придется подбирать композитный материал с большей упругостью.

Помимо этого, программный код требует значительной переработки, так как работу данного механизма необходимо связать с кинематикой принтера, а также с подачей прутка. Данная настройка весьма сложна и требует многочисленных тестов с разными видами пластиков.

Несмотря на перечисленные противоречия данное устройство имеет хороший потенциал для развития.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Авторское свидетельство № 189770 Российская Федерация, МПК В29С 64/209, В33У 30/00. Печатающая головка струйного 3d-принтера / Михрютин В. В. ; Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П. А. Соловьева». – 2019102635 ; заявл. 30.01.2019 ; опубл. 03.06.2019, Бюл. № 16. – 9 с.
2. Авторское свидетельство № 2609179 Российская Федерация, МПК В29С 67/04, В33У 10/00, В33У 40/00, В29С 41/32, В41F 17/00. Способ печати на струйном 3d-принтере / Исупов В. В. ; Исупов В. В. – 2015137736 ; заявл. 04.09.2015 ; опубл. 30.01.2017, Бюл. № 4. – 13 с.
3. Авторское свидетельство № 2760697 Российская Федерация, МПК В29С 64/209, В29С 48/70, В29С 48/05. Устройство для воздействия на объемный расход пластически деформируемого экструдированного материала / Кристофер Д. ; Фраунгофер-гезельшафт цур фердерунг дер ангевандтен Форшунг Э. Ф. – 2021107010 ; заявл. 05.09.2019 ; опубл. 29.11.2021, Бюл. № 34. – 11 с.

УДК 62-335

DOI: 10.35211/1990-5297-2025-3-298-57-60

А. А. Курилов, И. А. Генералов, И. С. Торубаров

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПЯТИОСЕВОГО 3D-ПРИНТЕРА ЗА СЧЕТ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЦЕССА КАЛИБРОВКИ

Волгоградский государственный технический университет

E-mail: aleksandrkurilovd@gmail.com, IvanGeneral2003@gmail.com,
is.torubarov@gmail.com

Предложена система автоматической установки датчика калибровки для пятиосевого 3D-принтера, которая позволяет автоматизировать один из этапов калибровки, тем самым снизить время подготовки к работе и повысить точность установки датчика. В разработанном варианте датчик автоматически снимается и устанавливается на печатающую головку. Система проста по конструкции, и из дополнительных электрических исполнительных механизмов требуется только соленоид.

Ключевые слова: автоматическая калибровка, датчик, платформа, сопло, печать

A. A. Kurilov, I. A. Generalov, I. S. Torubarov

INCREASING THE EFFICIENCY OF A FIVE-AXIS 3D PRINTER BY AUTOMATIZING THE CALIBRATION PROCESS

Volgograd State Technical University

The system of automatic installation of the calibration sensor for a five-axis 3D printer is proposed, which allows automating one of the calibration stages, thus reducing the preparation time and increasing the accuracy of the sensor installation. In the developed version, the sensor is automatically removed and installed on the print head. The system is simple in design, and only a solenoid is required from additional electrical actuators.

Keywords: automatic calibration, sensor, platform, nozzle, printing

3D-принтеры, работающие по технологии FDM, нашли широкое применение как в промышленности для производства серийных изделий и прототипов, так и в домашнем пользовании. Одной из основных их проблем является необходимость регулярной установки зазора между соплом и поверхностью, описанная в статье [1].

Способы проведения процесса калибровки разрабатывались и изучались многими научными коллективами и компаниями.

В многоосевой производственной платформе (рис. 1) [2] используется система автоматической смены инструмента (рис. 2). Используемая система автоматической смены инструмента вклю-

чает в себя карусель и пневматический захват. Данная система работает следующим образом: при поступлении управляющей команды, шпиндель перемещается и становится на один уровень с каруселью. Затем выдвигается пневматический

захват, который захватывает инструмент из карусели, устанавливает его в шпиндель многоосевой производственной платформы и фиксирует на коническую посадку. Далее пневматический захват возвращается в исходное положение.

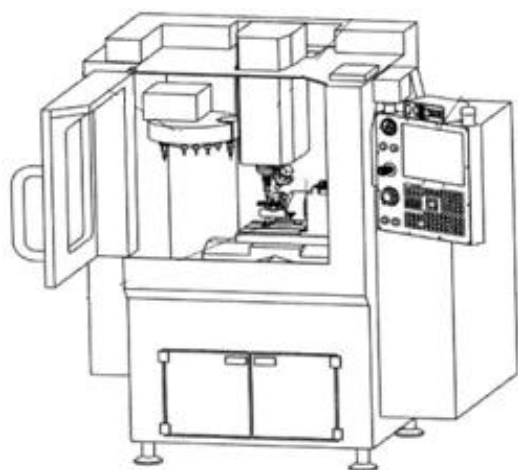


Рис. 1. Многоосевая производственная платформа

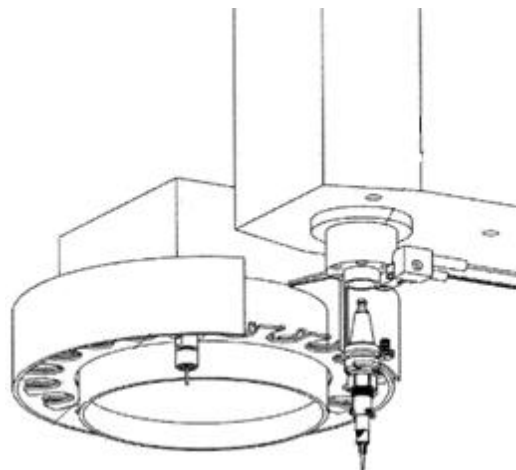


Рис. 2. Вид автоматической системы установки оснастки

Недостатком данной системы является то, что она существенно ограничивает рабочую область данного устройства.

Для ускорения и повышения точности данного процесса предложено устройство для автоматической установки датчика [3] калибровки аддитивной установки (рис. 3), которое состоит из пластины под контактную вилку 1, ус-

тановочных винтов 2, двух прижимных пластин 3 и 4, закрепленным на них магнита 5, ложе-мента 7, внутри которого находится датчик автокалибровки 6, крепление ложе-мента 14 и со-леноида 13, в котором находится шток 10 с за-крепленным на нем фиксатором 9, соленоид 13 и крепление ложе-мента 14 соединены между собой крепежными винтами 12.

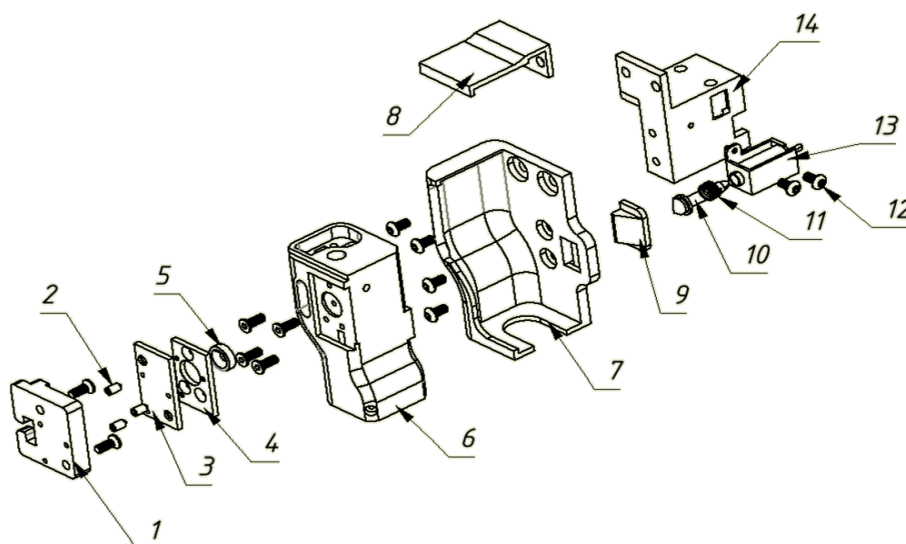


Рис. 3. Устройство для установки датчика автоматической калибровки

Устройство работает следующим образом (рис. 7): при включении режима автоматической калибровки печатающая голова аддитивной установки, на которой находится прижим-

ная пластина 3, подъезжает к датчику автокалибровки 6 по траектории 1-2 (рис. 4, 8), который находится в ложементе 7 и зафиксирован с помощью со-леноида 13 фиксатором 9.

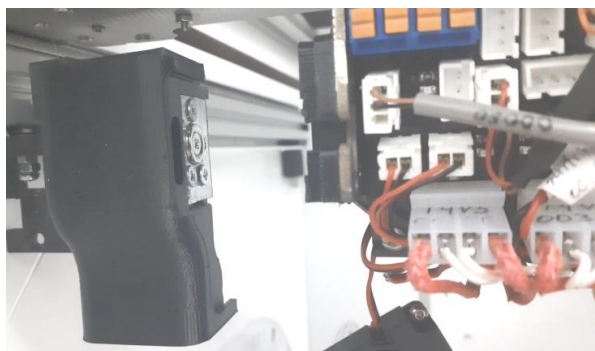


Рис. 4. Перемещение печатающей головки в сторону датчика

После того как прижимные пластины 3, 4 оказались на расстоянии близком друг к другу, они фиксируются между собой магнитом 5 и позиционируются с помощью установочных винтов 2 в трех точках. Затем шток соленоида 10

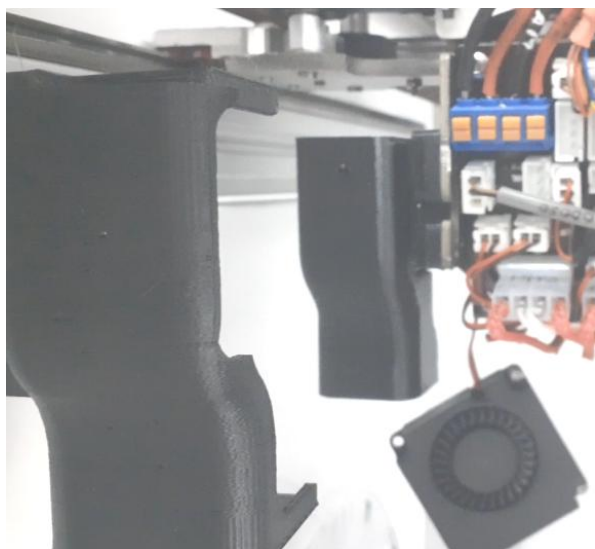


Рис. 5. Перемещение печатающей головки в точку начала проведения процесса калибровки

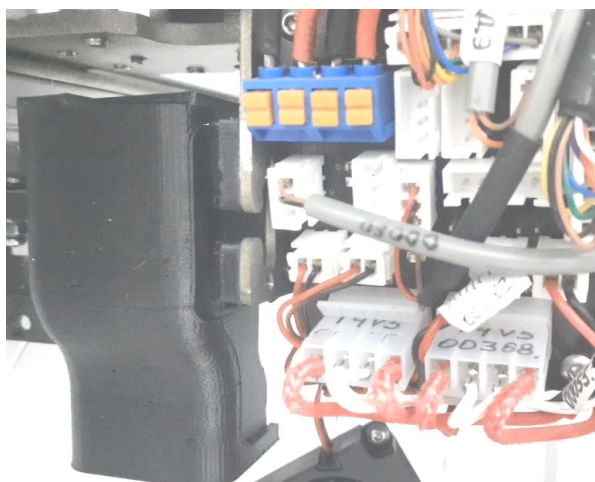


Рис. 6. Перемещение печатающей головки вместе с датчиком к ложементу

втягивается, тем самым фиксатор 9 отодвигается по траектории 3, и печатающая головка с датчиком 6 движется по траектории 4-5 (рис. 5, 8) и производит процесс автоматической калибровки.

После завершения процесса автоматической калибровки печатающая головка движется по траектории 6-7 (рис. 6, 8).

После того как датчик оказался в ложементе шток соленоида 10 под действием пружины 11 перемещается по траектории 8. Далее печатающая головка движется по траектории 9-10 (рис. 8).

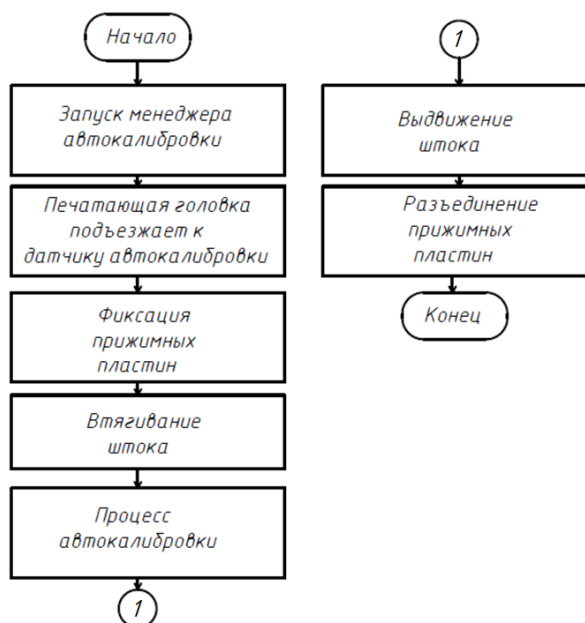


Рис. 7. Алгоритм работы системы установки датчика автоматической калибровки пятиосевой аддитивной установки

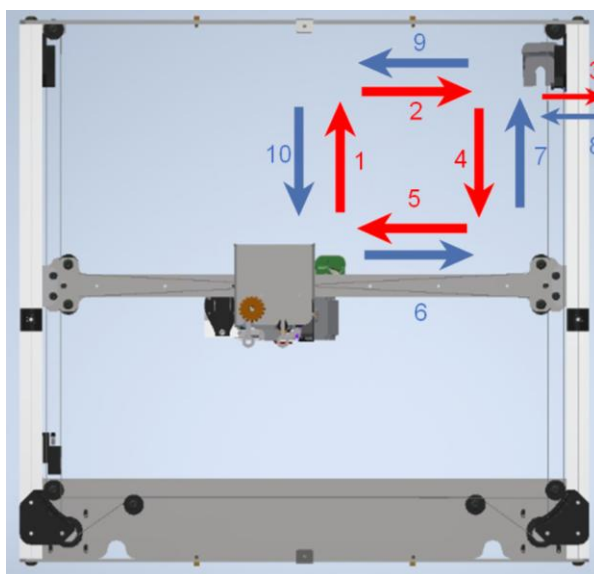


Рис. 8. Траектория движения печатающей головки

В ходе работы был изготовлен и установлен на пятиосевой 3D-принтер прототип системы автоматической установки датчика автоматиче-

ской калибровки (рис. 9, 10), а также написана управляющая программа:

Снятие датчика:

- 1) G1 X150 Y305 Z 0
- 2) G1 X305 Y305 Z 0
- 3) M106 S255
- 4) G1 X305 Y150 Z 0
- 5) G1 X150 Y150 Z 0

Процесс калибровки...

Возврат датчика:

- 6) G1 X305 Y150 Z 0
- 7) G1 X305 Y305 Z 0
- 8) M107
- 9) G1 X150 Y305 Z 0
- 10) G1 X150 Y150 Z 0

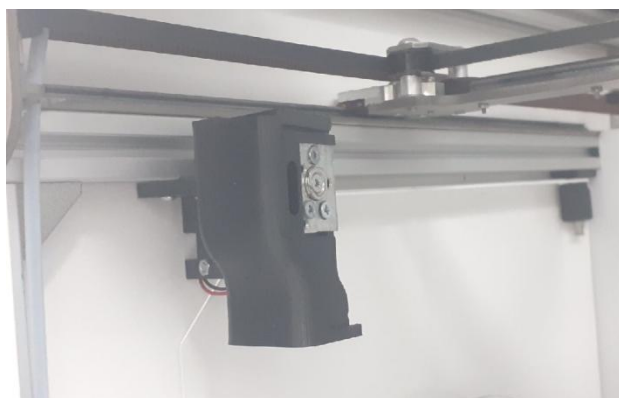


Рис. 9. Расположение механизма установки датчика на модуле XY

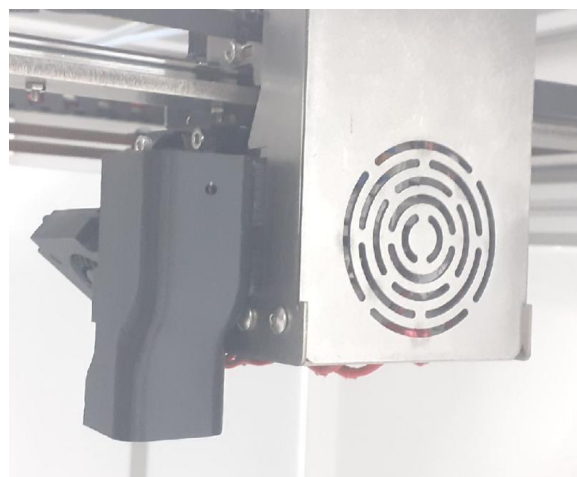


Рис. 10. Расположение датчика на печатающей головке

3D-модель данной системы была разработана с помощью программного комплекса машиностроительного конструирования Autodesk-Inventor.

В устройстве применен новый способ фиксации датчика на печатающей головке и на корпусе, аддитивной установке.

Предложенная конструкция позволяет значительно упростить и автоматизировать процесс автоматической калибровки, сокращая время калибровки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Курилов, А. А. Повышение производительности пятиосевой аддитивной установки за счет автоматизации процесса калибровки / А. А. Курилов, И. А. Генералов, А. В. Дроботов // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 1 (296) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2025. – (Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении»). – С. 78–81. – DOI: 10.35211/1990-5297-2025-1-296-78-81.
2. Пат. US2021036222A1 США, МПКВ22F1 / 05. 5-осевое трехмерное производство ; № 16/977,467 ; заявл. 01.03.2020 ; опубл. 25.11.2021. – 38 с.
3. Пат. 2812518 C1 Российская Федерация, МПК G01B 7/008, G01B 7/016, G01B 5/016. Контактный датчик. – № 2023101002 ; заявл. 18.01.2023 ; опубл. 30.01.2024, бюл. № 4. – 11 с.

УДК 681.5

DOI: 10.35211/1990-5297-2025-3-298-61-64

*М. П. Кухтик, А. Ю. Хамраев***РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА И ПРОГРАММЫ УПРАВЛЕНИЯ РАБОТОЙ
ВЕСОВОГО ДОЗАТОРА ИНЕРТНЫХ МАТЕРИАЛОВ ГРУБО/ТОЧНО****Волгоградский государственный технический университет**

E-mail: mpkuhtik@gmail.com, ronin_236@mail.ru

Разработан алгоритм управления работой весового дозатора инертных материалов грубо/точно. Написана управляющая программа в среде программирования ELHART LogicOn Soft на языке релейной (лестничной) логики LD.

Ключевые слова: весовой дозатор, инертные материалы, алгоритм, программа управления

*М. Р. Kukhtik, A. Yu. Khamraev***DEVELOPMENT OF AN ALGORITHM AND PROGRAM FOR CONTROLLING
THE OPERATION OF A COARSE/FINE WEIGHING BATCHER FOR INERT MATERIALS****Volgograd State Technical University**

An algorithm for controlling the operation of a coarse/fine weigh batcher for inert materials has been developed. A control program has been written in the ELHART LogicOn Soft programming environment using the LD relay (ladder) logic language.

Keywords: weighing batcher, inert materials, algorithm, control program

Одной из основных задач в таких отраслях промышленности, как производство строительных материалов, пищевая промышленность, химическая и фармацевтическая промышленность, является точное и надежное дозирование инертных материалов, т. е. вещества, которые не способны реагировать химически с другими веществами или их обстановкой.

В результате автоматизации работы весовых дозаторов достигается более точное и эффективное дозирование вещества, а также снижаются риски ошибок оператора и улучшается качество производства [1, 2].

В ходе прохождения производственной практики был исследован принцип работы весового дозатора инертных материалов и составлена его функциональная схема (рис. 1).

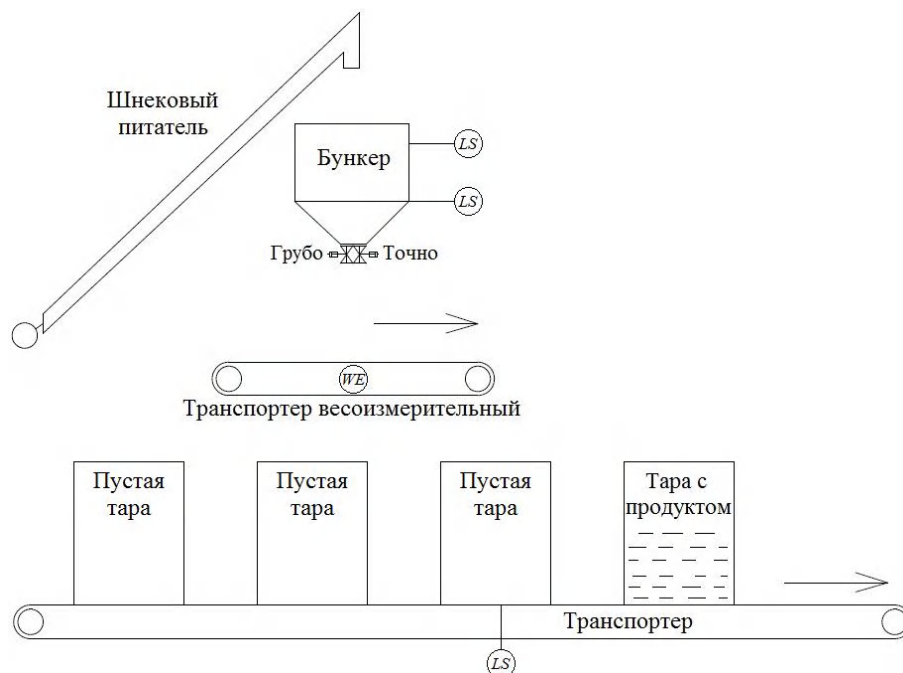


Рис. 1. Функциональная схема весового дозатора

На этой основе разработан алгоритм управления работой весового дозатора грубо/точно, представленный на рис. 2 и 3 [3]. Продукт по шнековому питателю поступает в бункер, отмеряющий по показаниям емкостных датчиков уровня количество продукта, необходимое для запуска системы.

При срабатывании нижнего датчика уровня шнековый питатель начинает подавать продукт в бункер. При срабатывании верхнего датчика уровня шнековый питатель останавливается. Открываются обе задвижки, и продукт начинает поступать на весоизмерительный транспортер.

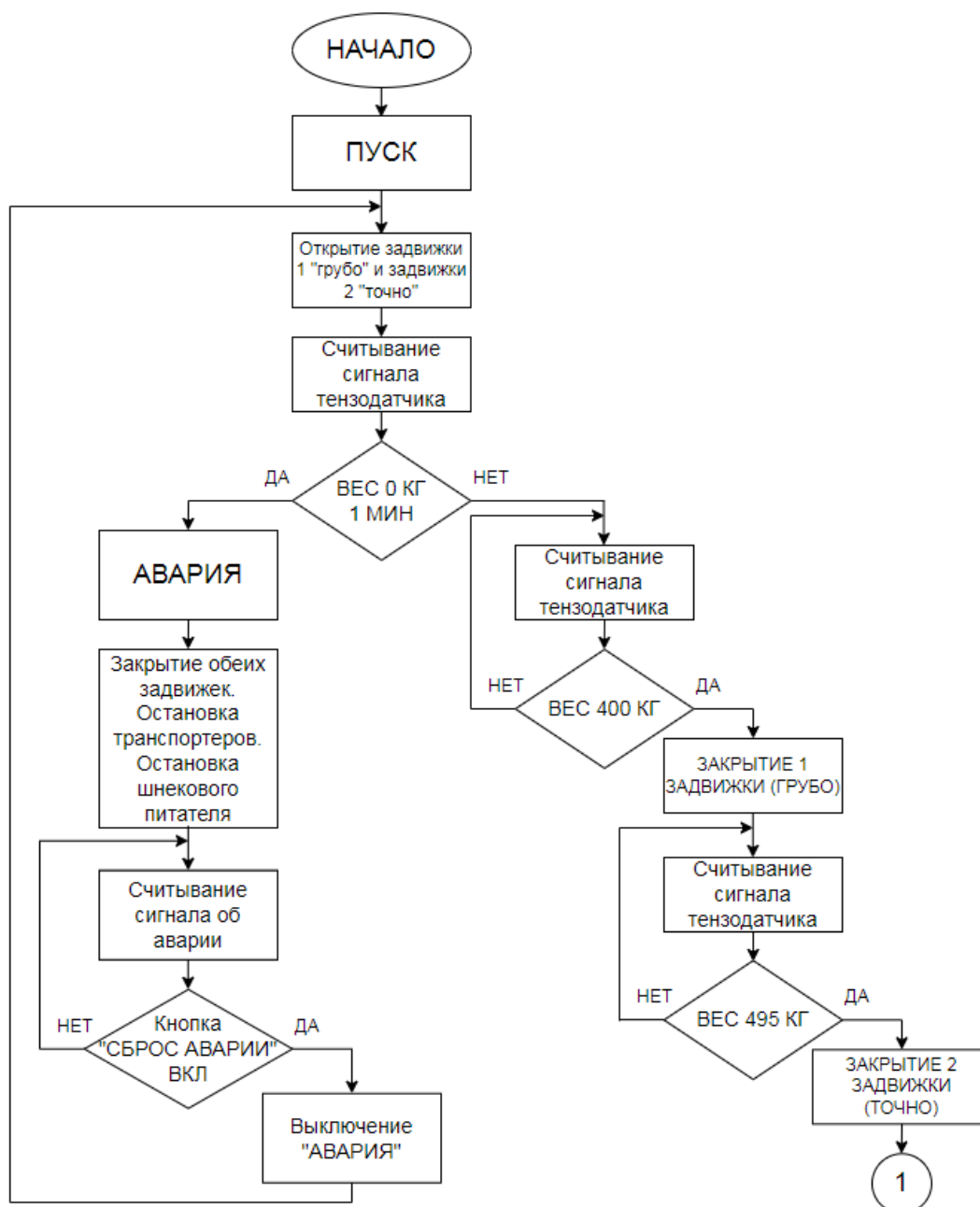


Рис. 2. Алгоритм работы весового дозатора (начало)

При достижении весом, который считывает тензодатчик, значения 400 кг на весоизмерительном конвейере закрывается задвижка «грубо», а при достижении 495 кг закрывается задвижка «точно». Весоизмерительный транспортер

совершает поступательное движение, сбрасывая продукт на большой транспортер в заранее установленную тару, положение которой контролирует ультразвуковой датчик. Затем цикл работы весового дозатора повторяется.

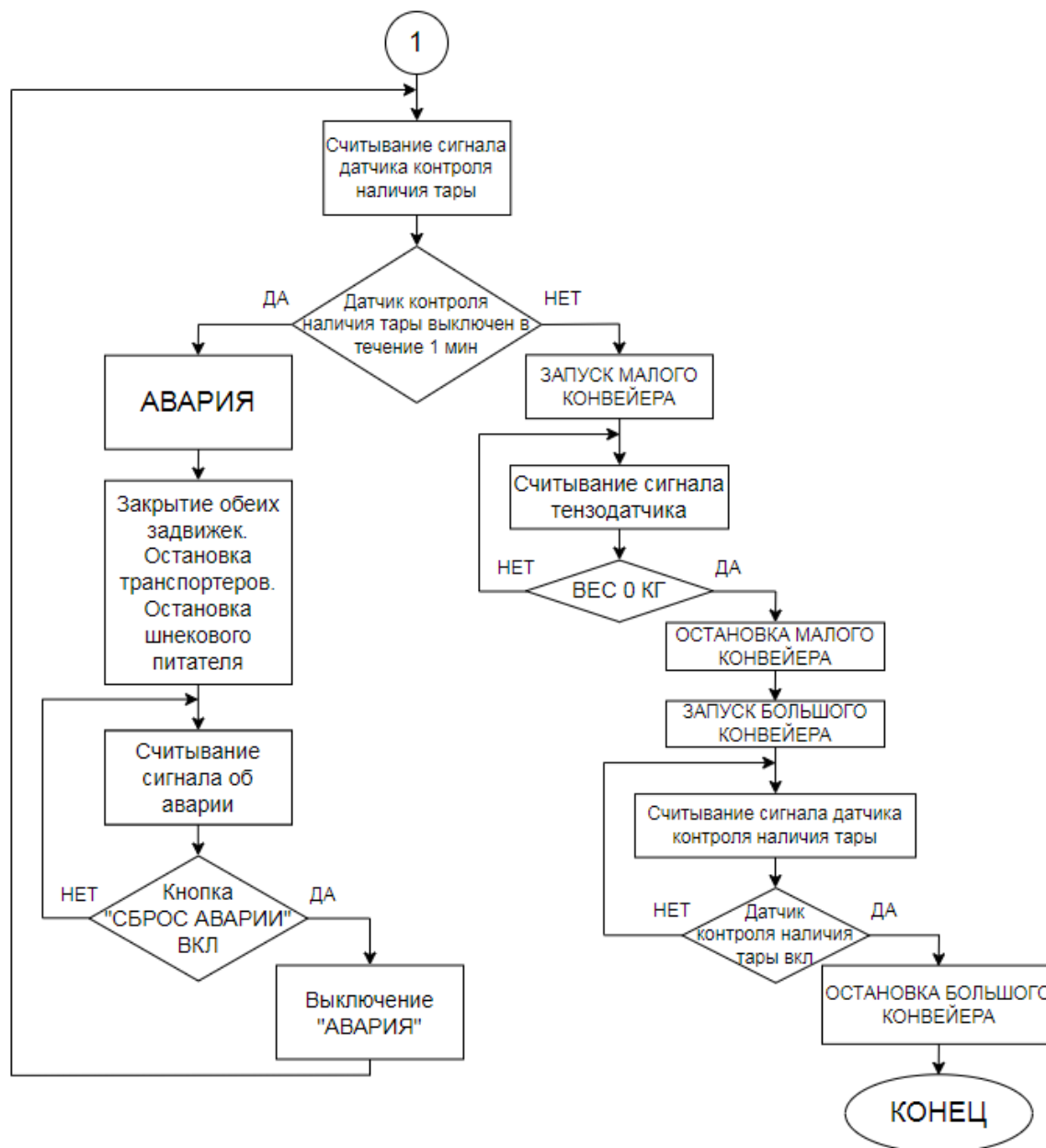


Рис. 3. Алгоритм работы весового дозатора (окончание)

Рассмотренный алгоритм реализован в среде программирования ELHART LogicOn Soft на языке релейной (лестничной) логики LD. На рис. 4 представлен фрагмент программы управления. Здесь показано поступление инертного материала в бункер. При нажатии кнопки «Пуск» (вход ПЛК X0) начинает рабо-

тать шнековый питатель (выход ПЛК Y0) и подавать продукт в бункер, пока работает датчик нижнего (критического) уровня (вход ПЛК X1) до тех пор, пока не сработает датчик верхнего уровня (вход ПЛК X2). При срабатывании датчика верхнего уровня шнековый питатель останавливается.

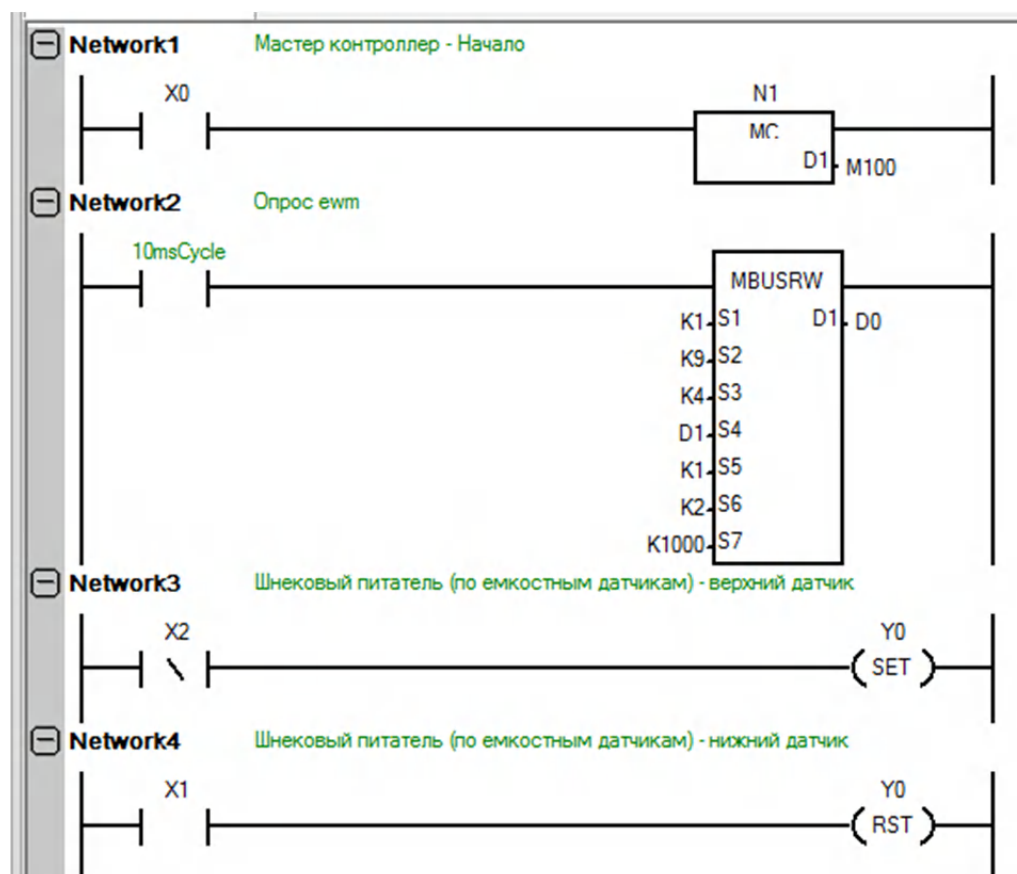


Рис. 4. Фрагмент программы управления

Рассмотрим потери времени, которых позволяет избежать разработанный алгоритм. Производительность дозатора с учетом ручного пополнения бункера и ручной замены тары равна 0,8 т/ч. Пополнение бункера занимает 5 минут, а замена тары – 7 минут. За счет автоматизации данных операций, т. е. применения шнекового питателя и транспортера, эти временные затраты сводятся к нулю, что позволяет увеличить производительность работы весового дозатора до 1 т/ч.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Разработка универсального весового дозатора с автоматическим управлением / И. М. Шандыбина, А. М. Макаров, М. П. Кухтик [и др.] // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2020. – № 11. – С. 516–521.
2. Шандыбина, И. М. The Development and Study of a General-Service Automatically Controlled Weighing Batcher / И. М. Шандыбина, А. М. Макаров, М. П. Кухтик // Proceedings of the 7th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2021) (Sochi, Russia, 17-21 May, 2021). Vol. I / ed. by A. A. Radionov, V. R. Gasiyarov ; South Ural State University (national research university), Moscow Polytechnic University, Platov South-Russian State Polytechnic University, Volgograd State Technical University. – Cham (Switzerland) : Springer Nature Switzerland AG, 2022. – P. 270–277. – DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-85233-7_32. – (Book ser. Lecture Notes in Mechanical Engineering – LNME).
3. Хамраев, А. Ю. Автоматизированная система управления работой весового дозатора инертных материалов / А. Ю. Хамраев // XXVIII Региональная конференция молодых ученых и исследователей Волгоградской области (г. Волгоград, 23 октября – 6 ноября 2023 г.) : сб. матер. конф. / редкол. : С. В. Кузьмин (отв. ред.) [и др.] ; ВолгГТУ [и др.]. – Волгоград, 2023. – С. 73–74.

УДК 681.5

DOI: 10.35211/1990-5297-2025-3-298-65-68

*М. П. Кухтик, М. С. Храмов***РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА И ПРОГРАММЫ УПРАВЛЕНИЯ РАБОТОЙ ДВУХКОНТУРНОЙ СИП-МОЙКИ****Волгоградский государственный технический университет**

E-mail: mpkuhtik@gmail.com, maks.khramov.02@bk.ru

Разработан алгоритм управления работой двухконтурной СИП-мойки. Написана управляющая программа в среде программирования ELHART LogicOn Soft на языке релейной (лестничной) логики LD.

Ключевые слова: СИП-мойка, алгоритм, программа управления

*М. P. Kukhtik, M. S. Khramov***DEVELOPMENT OF AN ALGORITHM AND PROGRAM FOR CONTROLLING THE OPERATION OF A TWO-CIRCUIT CIP WASHER****Volgograd State Technical University**

An algorithm for controlling the operation of a two-circuit CIP washer has been developed. A control program has been written in the ELHART LogicOn Soft programming environment in the LD relay (ladder) logic language.

Keywords: CIP washer, algorithm, control program

Безразборная мойка технологического оборудования (СИП) широко применяется в пищевой, фармацевтической и химической промышленности, где требуется высокая гигиеничность и безопасность для производства качественной и безопасной продукции. Работа СИП-мойки заключается в омывании емкостей хранения химическими веществами и водой в определенной последовательности.

В ходе прохождения производственной практики было исследовано техническое задание на разработку программного обеспечения для двухконтурной СИП-мойки, предназначенной для санитарной обработки оборудования и трубопроводной системы пастеризационной установки (рис. 1) [1]. На основе данного задания разработан алгоритм управления работой СИП-мойки, представленный на рис. 2 [2].

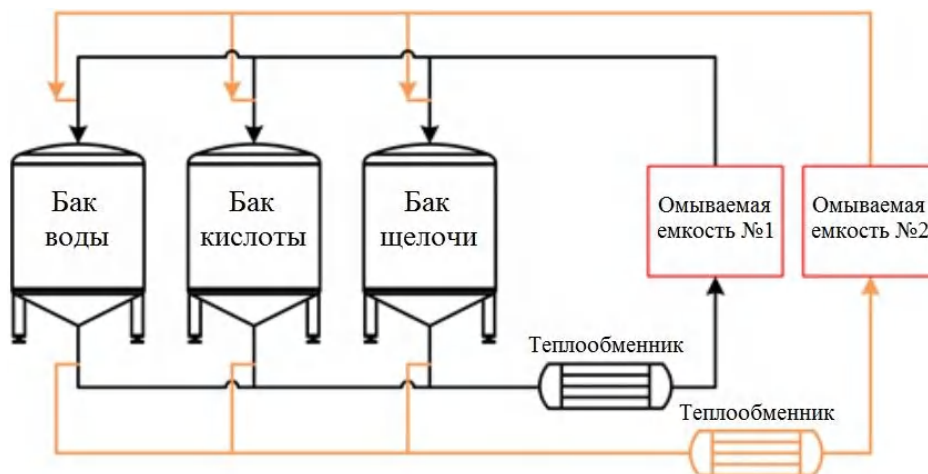


Рис. 1. СИП-мойка с двумя контурами

После включения питания прибора происходит прохождение стартовых тестов, опрос состояния датчиков. В данном режиме доступен вход в меню настройки и проверки. Клапаны закрыты, насосы отключены.

Далее осуществляется выбор полного или укороченного цикла СИП. Работа в режиме полного цикла СИП предполагает последовательное выполнение этапов «Ополаскивание 1», «Мойка щелочью», «Ополаскивание 2», «Мойка

кислотой», «Ополаскивание 3», в режиме укороченного цикла СИП – «Ополаскивание 1», «Мойка щелочью», «Ополаскивание 2». Для каждого из этапов алгоритма разработаны подробные блок-схемы. Также разработаны алгоритмы работы СИП-мойки в режиме укороченного цикла и мойки баков ополаскивающих жидкостей.

В качестве примера рассмотрим алгоритм этапа «Мойка щелочью» (рис. 3). Сначала от-

крываются клапаны мойки бака щелочи Кл2, возврата в бак щелочи К2, подачи из бака щелочи К5 (Контур № 1) и/или К2/2, К5/2 (Контур № 2) соответственно.

Затем включается клапан подачи воздуха на позиционер КВП1 и/или КВП2. Включается в работу ПИД-регулятор температуры жидкости в магистрали контура № 1 и/или № 2. Необходимое значение температуры поддерживается позиционером КП1 и/или КП2.

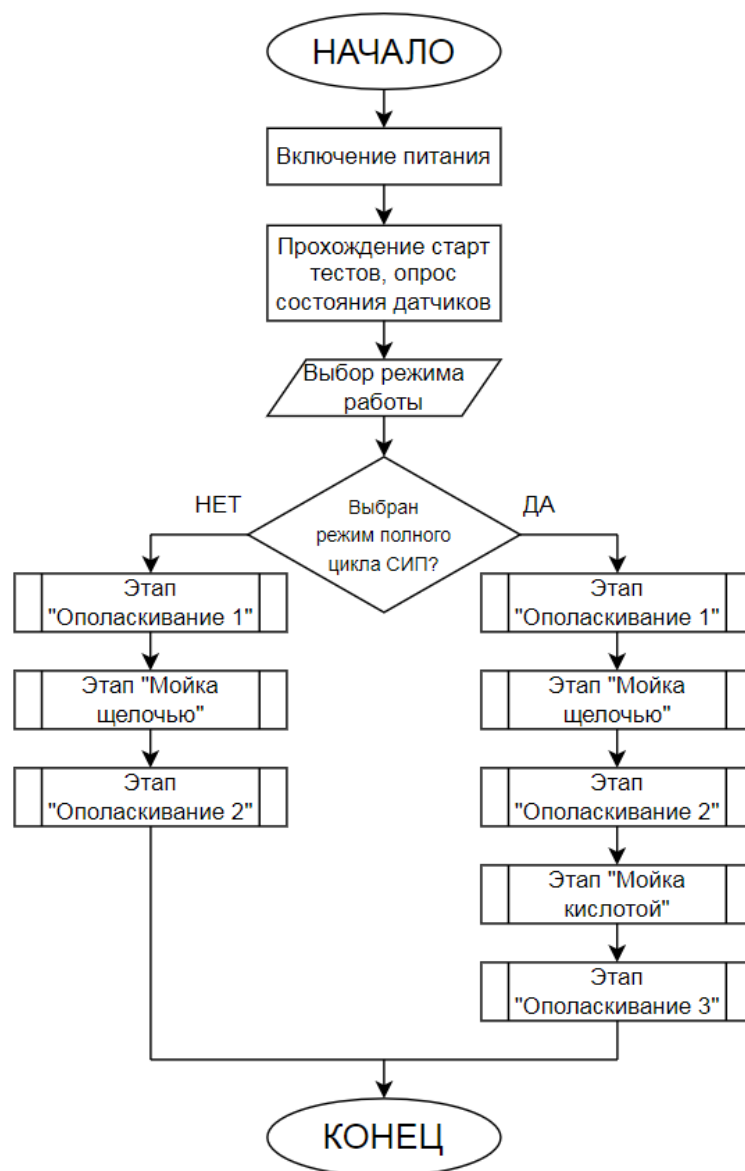


Рис. 2. Общий алгоритм работы СИП-мойки

С помощью датчика уровня осуществляется контроль уровня щелочи в баке щелочи. При превышении уставки НУЩ (нижний уровень щелочи) включается насос подачи НП1 и/или НП2. При падении уровня в баке щелочи ниже

уставки НУЩ этот насос отключается. После повышения уровня до уставки РУЩ (рабочий уровень щелочи) насос включается повторно с задержкой 30 с (значение настраивается при наладке от 0 до 60 с).

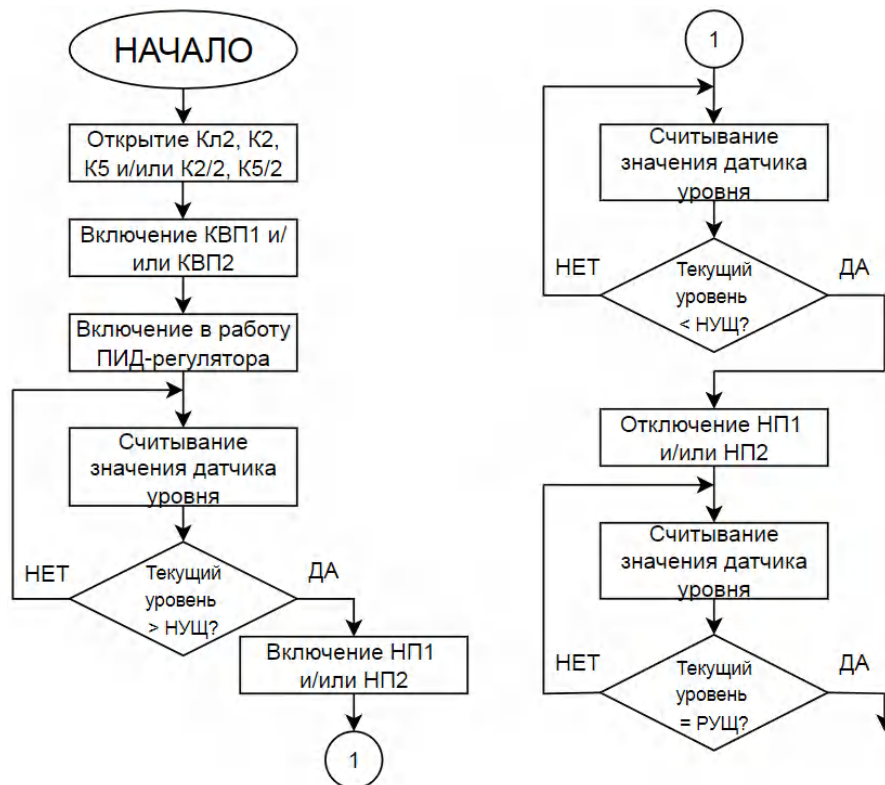


Рис. 3. Фрагмент алгоритма этапа «Мойка щелочью»

С помощью датчика PH осуществляется контроль значения кислотности щелочи PH2. При понижении PH2 ниже установленного значения включается дозирующий насос щелочи (ДНЩ), при достижении PH2 заданного значения ДНЩ отключается.

После этого с задержкой 15 мин. (значение настраивается при наладке от 0 до 30 мин.) закрываются клапаны K5 и/или K5/2, насос подачи НП1 и/или НП2, клапан позиционера КВП1 и/или КВП2. По достижении уровнем щелочи

уставки ВУЩ (верхний уровень щелочи) закрываются клапаны K2 и/или K2/2 и Кл2. В завершении этапа открывается клапан слива жидкости K10 и/или K10/2 из магистрали возврата на 1 мин. (значение настраивается при наладке от 0 до 120 с).

Все разработанные алгоритмы реализованы в среде программирования ELHART LogicOn Soft на языке релейной (лестничной) логики LD. На рис. 4 представлен фрагмент программы управления мойкой щелочью. Здесь выход-

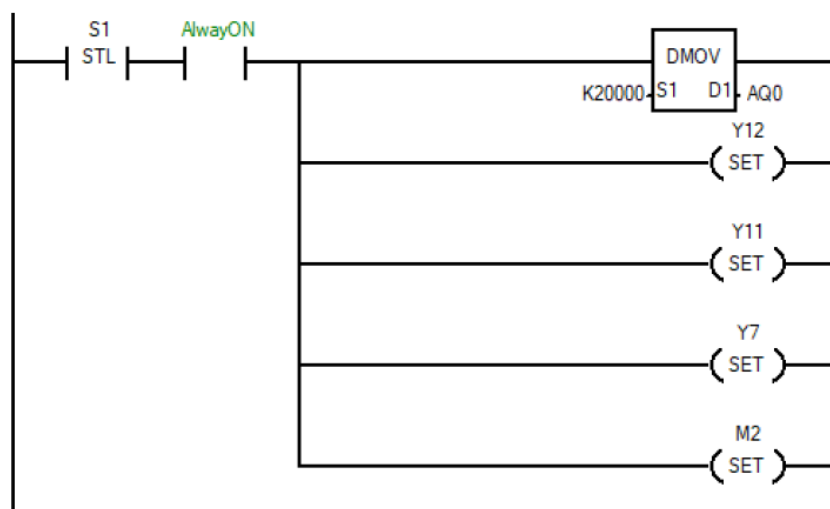


Рис. 4. Фрагмент программы управления

ное реле Y7 соответствует клапану подачи из бака щелочи, Y11 – клапану возврата в бак щелочи, Y12 – клапану мойки бака щелочи.

Внедрение разработанной программы управления позволит исключить брак продукции, вызванный заражением сред, устранить возможные ошибки оператора и исключить попадание моющих растворов в продуктовые линии или потерю продукта при мойке [3].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. СИР-мойка. Описание понятий «контур» и «линия» СИР-мойки [Электронный ресурс]. URL: <https://apora.ru/one/82/article> (дата обращения: 01.02.2025)
2. Храмов, М. С. Автоматизированная система управления работой СИП-мойки / М. С. Храмов // XXVIII Региональная конференция молодых ученых и исследователей Волгоградской области (г. Волгоград, 23 октября – 6 ноября 2023 г.) : сб. матер. конф. / редкол. : С. В. Кузьмин (отв. ред.) [и др.] ; ВолгГТУ [и др.]. – Волгоград, 2023. – С. 84–85.
3. Автоматизация СИП (СИР) станций [Электронный ресурс]. URL: <https://sautomatic.ru/направления-деятельности/автоматизация-сип-сир-станций> (дата обращения: 01.02.2025)

УДК681.5.015

DOI: 10.35211/1990-5297-2025-3-298-68-71

А. М. Макаров, М. Д. Редько, А. Д. Редько

ОПТИМИЗАЦИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ РАБОТЫ НАСОСОВ НА ОСНОВЕ ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА

Волгоградский государственный технический университет

E-mail: amm34@mail.ru, mihailredko130@gmail.com, alexandrredko01@gmail.com

В статье рассматривается оптимизация работы параллельных насосов в системе водоснабжения с переменными нагрузками с целью повышения энергоэффективности системы. Предложена модель управления на основе генетического алгоритма. Приведены результаты моделирования, подтверждающие эффективность данного алгоритма и сходимость его результатов с теоретическим решением.

Ключевые слова: генетический алгоритм, насосные системы, оптимизация, энергоэффективность

A. M. Makarov, M. D. Redko, A. D. Redko

DEVELOPMENT OF A SCHEME FOR AN EDUCATIONAL-TESTING STAND, SIMULATING THE OPERATION OF A PUMP STATION

Volgograd State Technical University

The article discusses the optimization of parallel pumps in a water supply system with variable loads in order to increase the energy efficiency of the system. A control model based on a genetic algorithm is proposed. The simulation results are presented, confirming the effectiveness of this algorithm and the convergence of its results with the theoretical solution.

Keywords: genetic algorithm, pumpsystems, optimization, energy efficiency

Водопроводные системы обеспечивают подачу воды потребителям, при этом основные затраты электроэнергии приходятся на насосы. В связи с ростом требований к повышенной энергоэффективности оптимизация работы насосных систем становится крайне актуальной задачей. Для ее решения могут применяться различные алгоритмы оптимизации.

В последнее время возрос интерес к генетическим алгоритмам (ГА) для систем водоснабжения. Оптимизация с помощью ГА хорошо подходит для работы систем распределения воды, благодаря способности работать с дискретными переменными и находить глобальные оптимумы в сложных системах. Оптимизация ре-

жимов работы насосов позволяет не только снизить энергопотребление, но и увеличить срок службы оборудования за счет обеспечения работы вблизи оптимальных условий [1, 2].

Настоящая статья посвящена разработке оптимизационной модели, основанной на генетическом алгоритме, для повышения энергоэффективности параллельной работы насосов в системе водоснабжения с переменными нагрузками.

Система водоснабжения (рис. 1) включает два насоса и пропорциональный клапан. Напор насосной установки определяется разностью давлений на выходе (P2) и входе (P1) установки, а требуемый напор системы – разностью давлений на выходе системы (P3) и входе (P1).

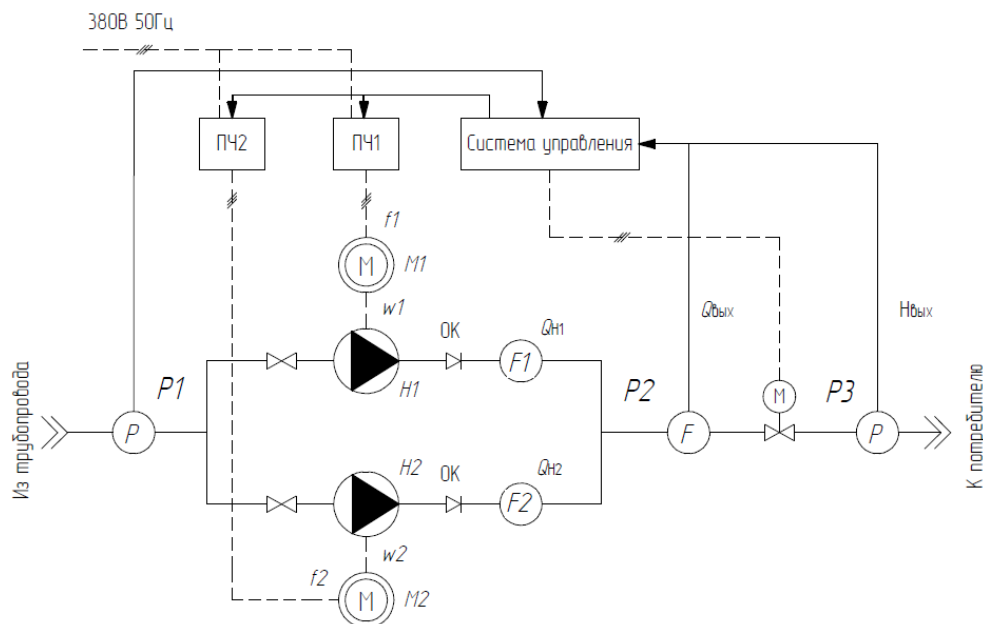


Рис. 1. Схема системы распределения воды

Целью оптимизации является обеспечение требуемых параметров системы (расхода и напора) с минимальными затратами и увеличением срока службы оборудования, что достигается регулированием частоты вращения насосов. Для упрощения, в данной работе основное внимание уделяется оптимизации со стороны насосов, без учета КПД преобразователя частоты (ПЧ) и двигателя, хотя обычно включает все три компонента.

Законы подобия описывают зависимости характеристик насоса от частоты вращения и выражаются следующими соотношениями:

$$\frac{Q}{Q_0} = S, \quad \frac{H}{H_0} = S^2, \quad \frac{P}{P_0} = S^3,$$

где $S = n/n_0$ – коэффициент частоты вращения; и Q_0 , H_0 и P_0 – характеристики при номинальной частоте вращения.

Мощность на валу насоса аппроксимируется следующим образом:

$$P = d_0 S^3 + d_1 Q S^2 + d_2 Q^2 S + d_3 Q^3$$

Фактор состояния W определяется как рабочий статус центробежного насоса (1 – работает; 0 – остановлен), поэтому целевая функция задачи оптимизации может быть определена как:

$$\max \eta = \frac{P g Q H}{\sum_{i=1}^n W_i (d_{0,i} S_i^3 + d_{1,i} Q_i S_i^2 + d_{2,i} Q_i^2 S_i + d_{3,i} Q_i^3)}$$

где Q – требуемый расход системы; H – требуемый напор системы; и Q_i – расход каждого насоса.

Ограничения в работе насосной системы определяются несколькими факторами. Коэффициент частоты вращения обычно не превышает 1 и ограничен снизу значением 0,75 для достижения эффективности и надежности. Общий расход системы равен сумме расходов отдельных насосов. Расход каждого насоса (Q_i) ограничен диапазоном $[Q_{imin}, Q_{imax}]$. Этот диапазон соответствует высокоэффективной зоне работы насоса. Q_{imax} представляет собой максимальный расход насоса при номинальной частоте вращения, а Q_{imin} – минимальный расход при минимально допустимой частоте вращения,

обеспечивающий высокую эффективность. Границы этого диапазона определяются характеристиками насоса. Напор каждого насоса (H_i) должен быть не меньше требуемого напора системы (H) для обеспечения необходимых параметров.

Теоретическое решение задачи оптимизации для системы, состоящей из нескольких идентичных насосов без регулирующих клапанов, предполагает, что наилучшим является режим работы, где расход (или частота вращения вала двигателя) одинаков для каждого насоса. Однако данный подход не учитывает максимально возможную надежность. Если насосы имеют разные характеристики или клапаны на отводящем трубопроводе, модель оптимизации

становится очень сложной, и ее теоретическое решение становится чрезвычайно трудным. Поэтому необходимо использовать более общий метод оптимизации [3].

Для применения ГА необходимо определить функцию пригодности, которую необходимо будет максимизировать. В данном случае, функция пригодности η представляет собой КПД насосной системы. Для учета ограничений вводятся штрафные функции, которые уменьшают значение функции пригодности при нарушении ограничений. Штраф за ограничение по напору рассчитывается следующим образом:

$$W_H = \sum_{i=1}^n W_{H_i}$$

$$W_{H_i} = \begin{cases} [H_i - (H + \xi_i Q_i^2)]^2 & (H_i \neq H + \xi_i Q_i^2) \\ 0 & (H_i = H + \xi_i Q_i^2) \end{cases}$$

где ξ_i – коэффициент сопротивления трубопроводов ответвления.

Штраф за ограничение по расходу каждого насоса определяется как:

$$W_Q = \sum_{i=1}^n W_{Q_i}$$

$$W_{Q_i} = \begin{cases} (Q_{imin} - Q_i)^2, & Q_i < Q_{imin} \\ 0, & Q_{imin} \leq Q_i \leq Q_{imax} \\ (Q_i - Q_{imax})^2, & Q_i > Q_{imax} \end{cases}$$

Итоговая функция пригодности, включающая штрафы, имеет вид:

$$\max \eta = \begin{cases} \eta - \sigma_1 W_Q - \sigma_2 W_H & W_Q > 0 \text{ или } W_H > 0 \\ \eta & W_Q = 0 \text{ и } W_H = 0 \end{cases}$$

где σ_1 и σ_2 – весовые коэффициенты для штрафов по расходу и напору, соответственно.

Несмотря на свои преимущества, стандартный генетический алгоритм может столкнуться с проблемой преждевременной сходимости. Для решения этой проблемы при оптимизации работы насосной системы будут применяться следующие методы: код Грея (усиливает локальный поиск, изменяя декодированное значение на смежное при изменении одного бита), элитная стратегия (лучшая особь копируется в следующее поколение напрямую), адаптивный оператор мутации (вероятность мутации выше для особей с низкой пригодностью) и изменение порядка операций (мутация перед кроссовером для упрощения реализации адаптивной мутации) [3].

В качестве модельных насосов выбраны два LeoAMS70/0.37. Из паспорта насоса видно, что наилучшая эффективность составляет 43 %, номинальный расход Q равен 3,6 м³/ч; напор H равен 14,6 м. Рабочая область установлена на $Q_i \in (2,5; 4,5)$ м³/ч.

Характеристические кривые модельного насоса аппроксимируются на основе данных образца продукции следующим образом:

$$H = 20.926S^2 - 2.962QS - 0.719Q^2$$

$$P = 0.0715S^3 + 0.036QS^2 - 0.0004Q^2S + 0.0014Q^3$$

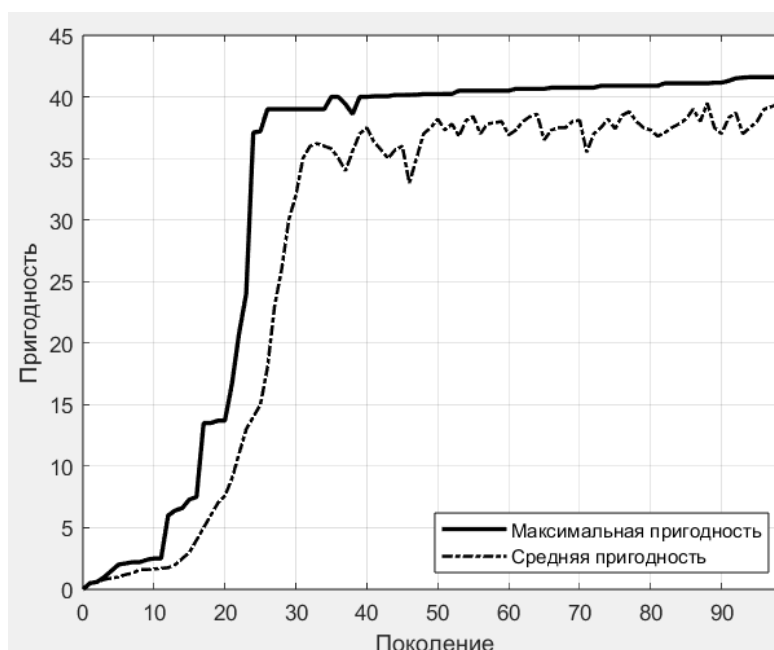


Рис. 2. Средняя и максимальная пригодность каждого поколения

Для кодирования параметров в генетическом алгоритме диапазоны возможных значений расхода и коэффициента частоты вращения делятся на 2^8 и 2^7 интервалов соответственно, каждому интервалу ставится в соответствие уникальная комбинация. Состояние включения второго насоса кодируется одним битом (включен/выключен). Таким образом, полное описание состояния двух насосов в параллельной

системе представляется 23-битным кодом Грея, например:

1:1100111:1001011:01111110

↓↓↓↓

$ONS_1=0.833$ $S_2=0.817$ $Q_1=2.83$

На рисунке 2 показаны средняя и максимальная пригодность, развивающиеся в каждом поколении.

Результаты оптимизации представлены в таблице.

Результаты оптимизации

Q , м ³ /ч	Q_1 , м ³ /ч	Q_2 , м ³ /ч	H_1 , м	H_2 , м	S_1	S_2	η , %	η_1 , %	η_2 , %
4	4	–	10,31	–	0,8679	–	41,81	42,08	–
5	2,52	2,48	10,11	10,10	0,7669	0,7649	42,61	43,05	43,43
6	2,94	3,06	10,20	10,20	0,8435	0,8429	41,33	42,01	42,57
7	3,53	3,47	10,38	10,37	0,8861	0,8803	40,31	41,08	41,84
8	4,03	3,96	10,45	10,45	0,9186	0,9111	39,15	40,03	40,91

Из таблицы видно, что два насоса работают вблизи точки наилучшей эффективности (ВЕР), и общая эффективность почти равна ВЕР насосов.

Для случая с идентичными насосами результаты оптимизации близки к «равным расходам», что согласуется с теоретическим решением.

Таким образом, предложенный подход позволяет снизить энергопотребление и увеличить срок службы оборудования, что делает его перспективным инструментом для оптимизации работы насосных станций.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ишназаров, О. Х. Современные тенденции в управлении насосными станциями: обзор и перспективы / О. Х. Ишназаров, М. У. Рахматова // Вопросы электроме- ханики. Труды ВНИИЭМ. – 2024. – С. 10–20.
2. Макаров, А. М. Automated System of Frequency Control for Drive of Cascade Pump Station of Random Configuration [Электронный ресурс] / А. М. Макаров, М. П. Кухтик // Proceedings 2018 International Ural Conference on Green Energy (UralCon) (Russian Federation, Chelyabinsk, October 4–6, 2018) / South Ural State University (national research university), IEEE Russia Siberia Section. – [Publisher: IEEE], 2018. – P. 265–269. – URL : <https://ieeexplore.ieee.org/document/8544349>.
3. Дунаев, М. П. Параметрическая оптимизация системы управления насосной станцией с помощью генетического алгоритма / М. П. Дунаев, Н. Н. Куцый, Н. Д. Лукьянов // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н. Э. Баумана. – 2014. – № 8. – С. 194–205.

УДК 681.5

DOI: 10.35211/1990-5297-2025-3-298-71-74

М. Е. Николаев, В. А. Перфилов, А. И. Демченко, Н. С. Бочкарев

ПЛАНИРОВАНИЕ ТРАЕКТОРИЙ ЗАХВАТА МАНИПУЛЯТОРА ПОЛУАВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПОГРУЗОЧНО-ТРАНСПОРТНОГО АГРЕГАТА ПО КРИТЕРИЯМ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ

Волгоградский государственный технический университет

E-mail: mr.maks.nikolaev.1994@mail.ru; vladimirperfilov@mail.ru; demcenkoanna719@gmail.com; Nikita_bochkarev_200@mail.ru

В современном мире в нефтегазовой промышленности при работе на складских платформах, при погрузке штучных грузов широко применяются погрузочные средства. В процессе выполнения погрузочно-транспортных операций функциональных возможностей манипуляционного механизма погрузчика и маневрирования шасси относительно погружаемого и транспортируемого объекта не хватает. Поэтому предлагается использовать полуавтоматизированный погрузчик на базе штабелера с тремя манипуляторами последовательной структуры, транспортной лентой с удерживающими устройствами для груза и сменным контейнером. Погрузчик позволяет автоматизировать процесс погрузки и разгрузки цилиндрических грузов на объектах нефтегазовой отрасли. В результате работы рассмотрен технологический процесс погрузочно-транспортных операций бочек с нефтью. Рассмотрена задача планирования программных движений грузозахватного органа.

Ключевые слова: погрузчик, степень подвижности, манипулятор, грузозахватный орган, сменный контейнер, цилиндрический груз, транспортная лента

M. E. Nikolaev, V. A. Perfilov, A. I. Demchenko, N. S. Bochkarev

PLANNING OF THE CAPTURE TRAJECTORIES OF THE MANIPULATOR OF A SEMI-AUTOMATED LOADING AND TRANSPORT UNIT ACCORDING TO ENERGY EFFICIENCY CRITERIA

Volgograd State Technical University

In the modern world, loading facilities are widely used in the oil and gas industry when working on warehouse platforms and when loading bulk cargoes. In the process of performing loading and transportation operations, the functionality of the loader's handling mechanism and chassis maneuvering relative to the object being loaded and transported is lacking. Therefore, it is proposed to use a semi-automated loader based on a stacker, with three manipulators of a sequential structure, a conveyor belt with cargo restraints, and a removable container. The loader allows you to automate the process of loading and unloading cylindrical loads at oil and gas facilities. As a result of the work, the technological process of loading and transportation operations of oil barrels is considered. The problem of planning the program movements of a lifting body is considered

Keywords: loader, degree of mobility, manipulator, lifting body, replaceable container, cylindrical load, conveyor belt

На данный момент на нефтегазовых предприятиях, при выполнении технологической операции погрузки и транспортировки штучных грузов, используют погрузчики штабелеры с различными грузозахватными устройствами. В целях автоматизации погрузочных работ, разработана конструкция погрузчика, имеющего три манипулятора, захватные устройства в виде клещей, транспортную ленту и сменный контейнер, которые позволят увеличить его производительность. Представлен технологический процесс. Рассмотрена задача планирования программных движений грузозахватного органа, когда цилиндрический груз располагается на объекте нефтегазовой отрасли в случайном порядке, при этом погрузчик движется с постоянной скоростью и выполняет заданный технологический процесс [1–3].

Для наибольшей эффективности работы погрузчика предлагается решить задачу планирования программных движений грузозахватного органа, когда цилиндрический груз расположен в хаотичном порядке и погрузчик движется с постоянной скоростью. Задача решается нахождением кратчайшего маршрута движения захвата (рисунок).

На объекте нефтегазовой отрасли в произвольном порядке расположены бочки с нефтью в точках $C_1, C_2, \dots, C_N$. Погрузчик перемещается с заданной скоростью, которая постоянна в соответствии с заданной программой ($V_{\text{сш}} = \text{const}$).

В кузов 1 погрузочно-транспортного средства с помощью манипулятора и транспортной ленты бочки направляются к кузову и происходит их захват и последующее размещение [4, 5].

Задача оптимального размещения бочек в кузове шасси решается путем нахождения

кратчайшего пути, который проходит через S_{12}, S_{23}, S_{34} и т. д.

$$\Phi_1 = \sum_{i=1}^n S_{i,i+1} \rightarrow \min. \quad (1)$$

В точке C_1 осуществляется захват бочки с нефтью. Затем грузозахватное устройство перемещает груз на конвейерную ленту в соответствии с заданными координатами, в результате чего точки M и C_1 совпадают.

Груз поднимается и захватывается с помощью свободного манипулятора, который перемещается по транспортеру. Затем он следует по кратчайшему маршруту P_i , к месту назначения. После чего происходит установка бочки в ближайшую точку сменного контейнера. В этом случае оптимальным перемещением будет то, которое осуществлялось по прямой линии.

$$\Phi_1 = \sum_{i=1}^n P_i \rightarrow \min. \quad (2)$$

Во время перемещения погрузчика $L_{\text{сш}}$, осуществляется перемещение захватного устройства H_1 (рисунок, б), по траектории P_1 .

Как только осуществится погрузка бочки C_1 грузозахватный орган перемещается к следующему захватываемому объекту C_2 . В случае, когда на пути движения захвата H_1 нет никаких препятствий, он может перемещаться по любой траектории. В таком случае, в качестве следующего показателя результативности можно рассматривать функцию, которая стремится минимизировать время.

$$\Phi_3 = \sum_{i=1}^n \frac{H_i}{V_{M_{cp}}} \rightarrow \min, \quad (3)$$

где $V_{\text{сш}} = \text{const}$; $V_{M_{cp}}$ – средняя скорость движения захвата в точке M за один цикл перемещения.

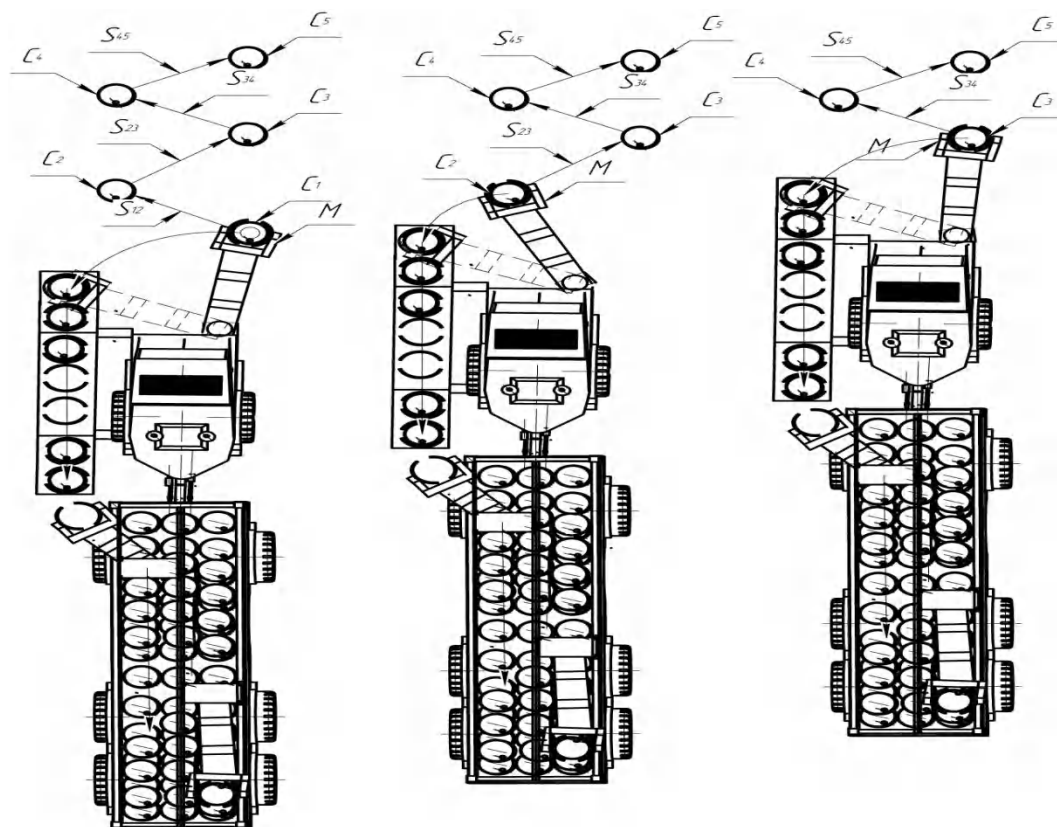


Схема программных движений исполнительных приводов манипулятора

Когда происходит захват бочки, грузозахватное устройство, следуя по траектории P_{i+1} , перемещается из точки C_2 в ближайшую свободную точку кузова. Этот процесс продолжается до тех пор, пока кузов погрузочно-транспортного агрегата не будет полностью заполнен.

В результате анализа были определены следующие критерии эффективности (1, 2, 3). Бочка загружается в кузов погрузчика по кратчайшей траектории P_i , так же перемещаем и грузозахватный органа к захватываемому объекту по траектории S_i . На перемещение H_i затрачиваем минимальное время.

Для создания траектории движения грузозахватного органа манипуляционного механизма, задаемся законом изменения траектории от времени.

Чтобы сформировать траекторию движения захвата манипулятора, нужно выяснить, как она меняется в зависимости от времени.

$$S_i(t) = \frac{(u_i^2 + u_{i-1}^2) \cdot V_{\max}^2 \cdot t^2}{4S'_i} + u_{i-1} \cdot V_{\max} \cdot t, \quad (4)$$

$u_i = V_i/V_{\max}$ в точке траектории, соответствующей i -му значению, скорость для выбранных приводов варьируется от 0,325 до 1;

$V_{\max} = 0,2$ м/с – скорость движения грузозахватного устройства; $S'_i = 1,1 \dots 3,2$ м – расстояние от груза до груза на i -м интервале.

Средняя скорость работы грузозахватного механизма на i -м отрезке пути, рассчитывается следующим образом.

$$V_i(S) = V_{\max} \left(\frac{u_i - u_{i-1}}{S'_i} \cdot S + u_{i-1} \right). \quad (5)$$

Важным критерием является то, насколько равномерно погрузчик перемещается по складу. Продолжительность технологической операции по загрузке бочек определяется по формуле:

$$T_{III} = \frac{N \cdot \sum_{i=1}^{N-1} l_i}{P_p} \cdot k_y + T_{ВЦ}, \quad (6)$$

N – число погружаемых объектов, находящихся в грузовом отсеке; l_i – расстояние между грузами; V_{cp} – средняя скорость передвижения погрузочно-транспортного агрегата; P_p – вероятность того, погрузочный агрегат задействован в работе; k_y – коэффициент потерь времени, который зависит от организации процесса погрузки, разгрузки и транспортировки бочек с нефтью,

а также от их пространственного размещения; $T_{вц}$ – время, которое уходит на техническое обслуживание погрузчика и не связано с его использованием.

Производительность погрузчика вычисляется с учетом того, что он будет перемещать грузы одинаковой массы, и выражается в виде.

$$W_T = n \cdot Q_n \cdot k_{zp} \cdot k_B \quad (7)$$

где $n = 3600/t_{ц}$ – алгоритмы движения захватываемых объектов, обеспечивающие непрерывную работу; $Q_n = 0,035 \dots 0,05$ т – масса погружаемого объекта; $k_{zp} = 0,65 \dots 0,85$, $k_B = 0,91$ – коэффициент, отражающий соотношение между весом груза и временем работы погрузочно-транспортного механизма; $t_{ц}$ – продолжительность движения захвата в рамках одного цикла, с.

Основываясь на формулах (4) и (5), можно определить длительность цикла:

$$t_{ц} = \varepsilon \sum_{i=1}^n \left(\frac{S_i}{v_i} + t_{II} \right), \quad (8)$$

где $\varepsilon = 0,7 \dots 0,8$ – коэффициент, который отражает степень совмещения технологических процессов; t_{II} – время, которое требуется для того, чтобы остановить, захватить и освободить объект, с.

В результате формулы (7) и (8) преобразуются следующим образом.

$$W_t = \frac{3600 \cdot Q_n \cdot k_{zp} \cdot k_B}{\varepsilon \sum_{i=1}^n \left(\frac{S_i}{v_i} + t_{II} \right)}. \quad (9)$$

Для проектируемого погрузчика, учитывая ранее принятые параметры, расчетная производительность составила 1,55, 1,62 и 1,89 т/ч при работе с грузами (бочками) весом 30, 40 и 50 кг соответственно [6, 7].

В результате работы представлен общий вид погрузочно-транспортного агрегата, рассмотрен технологический процесс погрузочно-транспортных операций бочек с нефтью в четыре этапа. Рассмотрена задача планирования программных движений грузозахватного органа.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Жадановский, Б. В. Организация строительно-монтажных и погрузочно-разгрузочных работ в строительстве автомобильными кранами / Б. В. Жадановский, С. А. Синенко, И. М. Мирошникова // Системные технологии. – 2018. – № 2 (27). – С. 41–48.
2. Шапоров, М. Н. Кинематический анализ механизма подъема контейнеров на погрузочно-транспортном агрегате / М. Н. Шапоров, И. С. Мартынов, М. А. Садовников, А. В. Седов // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. – 2019. – № 2 (54). – С. 346–354.
3. Потахов, Е. А. Методика контроля местной и общей устойчивости телескопической стрелы грузоподъемного крана / Е. А. Потахов // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. – 2019. – Т. 16. – № 2 (66). – С. 110–121.
4. Макеева, Е. И. Повышение эффективности эксплуатации погрузочной машины 2пнб-2 путем внедрения автоматизированного управления процессов подачи / Е. И. Макеева, М. Д. Мирославская // Наука и творчество: вклад молодежи : сб. матер. всерос. молодежной науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. – Махачкала, 2020. – С. 238–241.
5. Nikolaev M. E., Nesmianov I. A., Zaharov E. N. Definition of service area of agricultural loading robot with manipulator of parallel-serial structure // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. 747(1). doi: 10.1088/1757-899X/747/1/012125.
6. Zhoga V. V., Skakunov V. N., Terekhov S. E., Belikov V. A. The architecture of the control system for the mobile process robot with walking movers International Review of Mechanical Engineering. 2017. T. 11. № 5. pp.337-342.
7. Nikolaev, M., Nesmianov, I., Zhoga, V., Ivanov, A. Justification Parameters and Planning Capture Trajectories for Robotic Loading and Transport // Smart Innovation, Systems and Technologies 2022. 245. doi: 10.1007/978-981-16-3349-2_20

УДК 654.071.3

DOI: 10.35211/1990-5297-2025-3-298-74-77

А. П. Порхун, В. Г. Барабанов, В. С. Фомин, Е. А. Дьяченко МЕТОД ГАШЕНИЯ РЕЗОНАНСНЫХ ЧАСТОТ FDM ПРИНТЕРА

Волгоградский государственный технический университет

E-mail: sa.porkhun30@gmail.com, vbarabanov@vstu.ru,
vladfom2302@yandex.ru, zhenya.dyachenko.1999@gmail.com

В работе рассматривается исследование по теме резонансных частот при печати 3D-принтера, работающего по технологии моделирования методом послойного наплавления, и минимизация их влияния на качество продукции.

Ключевые слова: резонансные частоты, 3D-принтеры, послойное наплавление, Inputshaper

A. P. Porkhun, V. G. Barabanov, V. S. Fomin, E. A. Dyachenko

FDM PRINTER RESONANCE FREQUENCY ATTENUATION METHOD

Volgograd State Technical University

The paper considers a study on the topic of resonant frequencies when printing a 3D printer using the technology of modeling the method of layer-by-layer deposition, and minimizing their impact on product quality.

Keywords: resonant frequencies, 3D printers, layer-by-layer surfacing, Inputshaper

Технология 3D-печати является одной из самых быстроразвивающихся и инновационных в современном обществе, охватывая множество сфер нашей жизни. Она уже стала достаточно популярной, и многие люди знакомы с ее возможностями или даже использовали ее на практике. Безусловно, 3D-печать предлагает множество преимуществ, таких как возможность создания сложных и индивидуализированных объектов и ускорение прототипирования. Однако, помимо всех положительных аспектов, необходимо учитывать и некоторые ограничения этой технологии. Одним из основных недостатков является относительно низкая скорость и проблема повторяемости печати. Особенно это может повлиять при производстве крупных или сложных деталей, для которых требуется значительное время на завершение процесса.

Для повышения скорости и повторяемости 3D-печати возможно использование более мощных двигателей и усиленной конструкции принтера. Кроме того, внедрение современных кинематических схем, таких как *Delta* и *Scara*, может значительно оптимизировать процесс печати (рис. 1). Эти методы включают применение двигателей с увеличенной мощностью и модификацию конструкции для повышения точности изготовления изделий.

Такие улучшения способствуют ускорению печати и повышению качества готовых изделий. Однако следует учитывать, что такие изменения могут привести к увеличению габаритов и стоимости принтеров, а также потребовать дополнительных затрат на разработку соответствующего программного и аппаратного обеспечения [1].

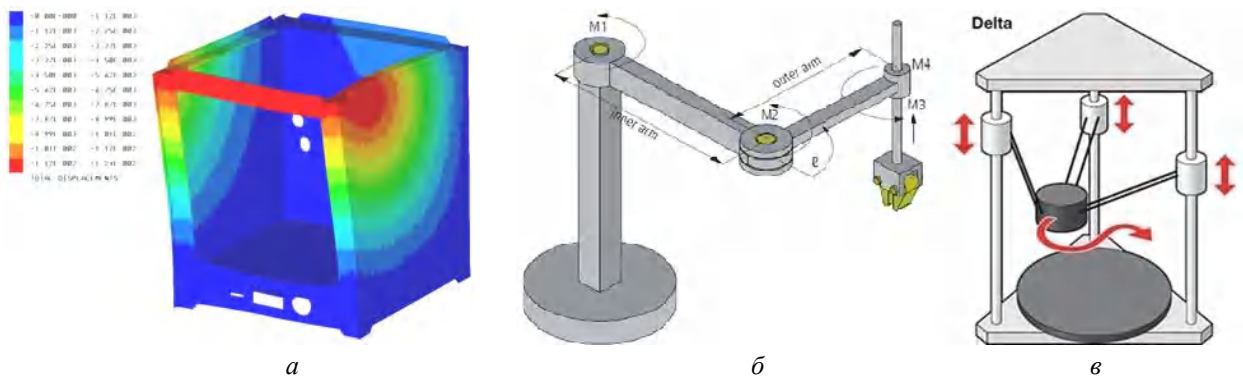


Рис. 1. Подходы увеличения скорости печати:

а – увеличение жесткости корпуса; б – Scara кинематика; в – Delta кинематика

Другим способом является метод *Inputshaper* (Компенсация резонанса). *Inputshaper* – это метод управления без обратной связи, который, разбивая одно цельное движение на несколько небольших, генерирует импульсы, гасящие собственные вибрации. Данный метод используется в нашем исследовании.

Алгоритм работы основан на перераспределении во времени силового воздействия на объект управления при сохранении неизменной величины суммарного воздействия. За счет относительного увеличения времени перехода системы из одного состояния в другое обеспе-

чивается компенсация возникающих колебаний, а сдвиг управляющего воздействия на полпериода (долю периода) вычисленных колебаний объекта управления обеспечивает в идеальном случае полное их подавление.

Суть *shaping*-алгоритмов заключается в формировании управляющего сигнала путем свертки задающего воздействия с последовательностью импульсов (дельта-функций Дирака) [3]. Амплитуды и интервал времени между этими импульсами влияют на степень подавления колебаний, длительность переходных процессов и диапазон частот колебаний, в котором алго-

ритм (фильтр) эффективен. *Shaping*-алгоритмы различаются используемыми последовательностями импульсов (методикой расчета амплитуд и интервалов времени между ними).

Чтобы гарантировать, что преобразованное *shaping*-фильтром входное воздействие приведет к такому же установившемуся значению, что и оригинальный задающий сигнал, в большинстве *shaping*-алгоритмов амплитуды импульсов принимаются такими, чтобы суммарное воздействие на систему осталось неизменным: $\sum_{i=1}^n A_i = 1$, где n – количество импульсов; A_i – амплитуда i -го импульса.

Один из главных видимых признаков, на который мы можем ориентироваться при оценке качества внешней поверхности детали является «эхо». Эхо – это дефект печати, при котором на ровных поверхностях появляются ореолы, рябь или звон, по форме повторяющие рядом находящийся угол или край отпечатка. Эхо возникает из-за механической вибрации принтера, вызываемой быстрой сменой направления движения печатной головки.

Мы предполагаем, что проблему эффекта-эхо, а следовательно, и прочностных характеристик на высоких скоростях печати, можно решить, применяя метод импульсного формирования (*Inputshaper*), без необходимости существенных изменений в конструкции устройства. Эта рабочая гипотеза основывается на предположении, что корректировка входного сигнала позволит контролировать и минимизировать нежелательные резонансные отклики.

Материальной базой исследования является: 3D-принтер «Voron 0.2R» – это 3D-принтер

из серии открытых проектов *Voron*, с кинематикой *Core XY*. Основные узлы – печатные, рама состоит из алюминиевых профилей;

модуль *EBB42* – это коммутационная плата экструдера. Соединение осуществляется через *CAN* или *USB*, что упрощает подключение кабелей к принтеру. Модуль был установлен на печатающей головке принтера и был подключен к основной плате через *USB*, на данной плате находится акселерометр *adx1345*.

Методика эксперимента:

- проведение теста с изменением ускорения перемещения печатающей головки с начальным значением 1500 мм/с^2 , с шагом 500 мм/с^2 на каждые 5 мм высоты напечатанного изделия;
- исследование поверхности на проявление дефекта “Эхо”, с фиксированием результатов;
- проведение тестов резонансов в автоматическом режиме с использованием датчика *adx1345*;
- применение подобранных значений в конфигурации принтера;
- проведение повторного теста (2) с последующим исследованием (3);
- определение итогов тестирования и проверки полученных результатов.

Конфигурационный файл прошивки, который содержит в себе секцию подключения платы *EBB42* по последовательному порту, секцию конфигурации датчика *ADXL345* подключенного по шине *SPI*, размещенного на плате *EBB42*, секцию конфигурации *INPUT_SHAPING*, секцию тестера резонансов, макросы для удобной работы с командами для исследования представлен на рис. 2.

```
[mcu EBB42]
serial:/dev/serial/by-id/usb-klipper_stm32g0b1xx_190844080E50425539393020-1f08

Прочитать 'add345' документации
[adxl345]
cs_pin:EBB42:PB12
spi_speed: 5000000
spi_software_sclk_pin:EBB42:PB10
spi_software_mosi_pin:EBB42:PB11
spi_software_miso_pin:EBB42:PB2

axes_map: X, Z, Y
rate: 3200

Прочитать 'input_shaper' документации
[input_shaper]
#shaper_freq_x: 0
#shaper_freq_y: 0
shaper_type: mzv
damping_ratio_x: 0.1
damping_ratio_y: 0.1

[resonance_tester]
probe_points: 60,60,60

accel_chip: adxl345
min_freq: 5
max_freq: 200
accel_per_hz: 100
hz_per_sec: 2

Прочитать 'gcode_shell_command' документации
[gcode_shell_command RESONANCE]
command: ~/klipper/scripts/calibrate_shaper.py /tmp/resonances_x_*.csv -o /tmp/shaper_calibrate_x.png
~/klipper/scripts/calibrate_shaper.py /tmp/resonances_y_*.csv -o /tmp/shaper_calibrate_y.png
timeout: 2.
verbose: True

Прочитать 'gcode_macro' документации
[gcode_macro TEST_RESONANCE]
gcode:
ACCELEROMETER_QUERY
G28
TEST_RESONANCES AXIS=X
TEST_RESONANCES AXIS=Y
RUN_SHELL_COMMAND CMD=RESONANCE
```

Рис. 2. Конфигурационный файл прошивки

Проведя тестирование с использованием датчика, мы получили частотные характери-

стики нашего принтера по двум осям *X* и *Y* (рис. 3).

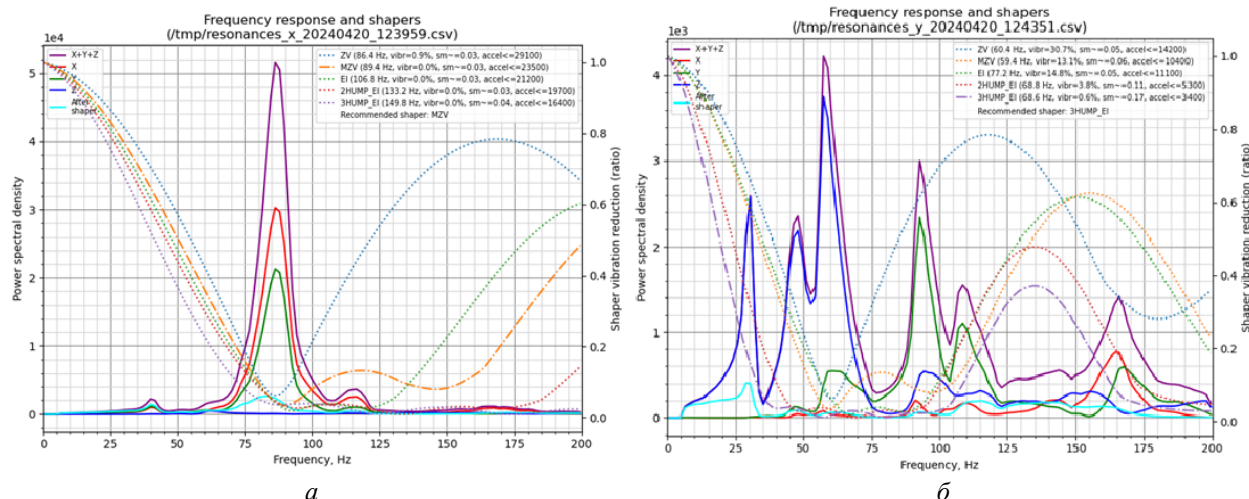


Рис. 3. Частотные характеристики:
а – по оси X; б – по оси Y

Система подает на моторы сигнал о движении в определенном направлении с ускорением и скоростью, в это время датчик снимает показания ускорений в этом направлении. Далее производится автоматический расчет и сопоставление сигналов, которые подавались на мо-

торы и снимались с них, строится частотная характеристика для каждой из осей принтера.

По графикам определяются пиковые резонансные частоты. Выбираем метод гашения по оси X – MZV с частотой 89,4 Гц, по оси Y – 3HUMP_EI с частотой 59,4 Гц.

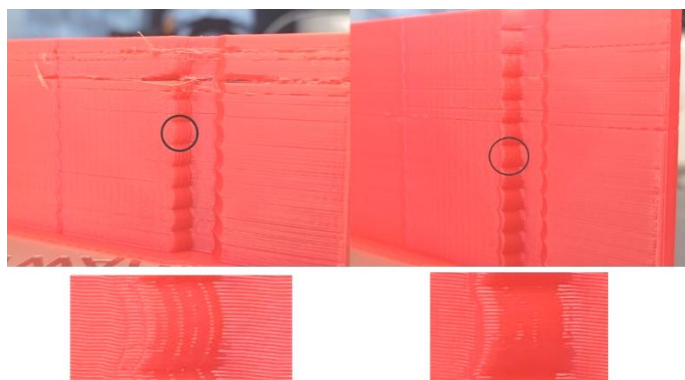


Рис. 4. Сравнение печати деталей:
слева – без inputshaper, справа – с inputshaper

По итогам проведенных экспериментов были получены две печатные детали (рис. 4). Первая печаталась с ускорением перемещения печатающей головки с начальным значением 1500 мм/с^2 , с шагом 500 мм/с^2 на каждые 5 мм высоты напечатанного изделия, а вторая печаталась с такими же параметрами печати, но с использованием алгоритма *inputshaper*. Разница в качестве печати лучше всего видна на шестом слое обеих деталей: деталь, напечатанная без *inputshaper* имеет 6 волн «Эхо», на второй этот эффект полностью отсутствует.

Данные результаты показывают, что использование алгоритмов гашения резонансных частот позволяют увеличивать скорость печати без потери прочностных характеристик, а также повысить повторяемость деталей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дьяченко, Е. А. Способы повышения скорости печати FDM / Е. А. Дьяченко, А. П. Порхун, М. Ю. Козенко // XXVIII Региональная конференция молодых ученых и исследователей Волгоградской области (г. Волгоград, 23 октября – 6 ноября 2023 г.) : сб. материалов конф. / редкол. : С. В. Кузьмин (отв. ред.) [и др.] ; ВолгГТУ [и др.]. – Волгоград, 2023. – С. 187.
2. Порхун, А. П. Экспериментальное исследование гашения резонансных частот FDM принтера / А. П. Порхун, Н. А. Золотых // Конкурс научно-исследовательских работ студентов Волгоградского государственного технического университета (г. Волгоград, 22–26 апреля 2024 г.) : тез. докл. / редкол. : С. В. Кузьмин (отв. ред.) [и др.] ; ВолгГТУ, Отдел координации научных исследований молодых ученых УНИИ, Общество молодых ученых. – Волгоград, 2024. – С. 16.
3. Дельта-функция Дирака и ее приложения: метод. указания к выполнению домашних заданий и подготовке к контрольным работам / А. Н. Павленко, О. А. Пихтилькова ; Оренбургский гос. ун-т. – Оренбург : ОГУ, 2017.

УДК 621.7/9:004.925.84

DOI: 10.35211/1990-5297-2025-3-298-78-81

*А. С. Пронин, К. А. Драпак, В. С. Фомин***АНАЛИЗ АЛГОРИТМА INPUT SHAPING ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ ТОЧНОСТИ
ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ПЕЧАТАЮЩЕЙ ГОЛОВКИ АДДИТИВНЫХ УСТАНОВОК
С ВСТРОЕННЫМ ПРОГРАММНЫМ ОБЕСПЕЧЕНИЕМ KLIPPER*****Волгоградский государственный технический университет**

E-mail: app@vstu.ru, apronin03@mail.ru, loldra@yandex.ru

Vladfom2302@yandex.com

Проведен анализ функциональных возможностей и преимуществ Klipper – прошивки для 3D-принтеров с целью определения ее эффективности как программного решения для управления 3D-печатью. Представлены результаты изучения алгоритмов Klipper, таких как «look-ahead», «minimum cruise ratio» и «input shaping», которые повышают качество печати за счет уменьшения вибраций и более точного управления движением печатающей головки. Описана интегрированная система, включающая гибкие настройки и обеспечивающая высокую производительность, и алгоритмы оптимизации движения.

Ключевые слова: Klipper, 3D-печать, алгоритм, ПО, аддитивные технологии, Input Shaping

*A. S. Pronin, K. A. Drapak, V. S. Fomin***ANALYSING THE INPUT SHAPING ALGORITHM FOR IMPROVING
THE PRINthead MOVEMENT ACCURACY OF ADDITIVE
MANUFACTURING PLANTS WITH KLIPPER EMBEDDED SOFTWARE****Volgograd State Technical University**

The functionality and benefits of Klipper, a firmware for 3D printers, are analysed to determine its effectiveness as a software solution for 3D printing control. Klipper algorithms such as 'look-ahead', 'minimum cruise ratio' and 'input shaping', which improve print quality by reducing vibration and more accurately controlling print head movement, are analysed. An integrated system is described that includes flexible settings for high productivity and motion optimisation algorithms.

Keywords: Klipper, 3D printing, algorithm, software, additive technologies, Input Shaping

Аддитивные технологии, также известные как 3D-печать, представляют собой быстро развивающуюся область, которая предоставляет новые способы производства различных деталей и изделий. В основе этих технологий лежит послойное создание объектов на основе цифровых 3D-моделей, что позволяет производить изделия сложной геометрии, которые трудно или невозможно изготовить традиционными методами [1]. Развитие аддитивных технологий неразрывно связано с совершенствованием программного обеспечения, далее ПО, которое играет ключевую роль в каждом этапе процесса, от проектирования до производства.

Несмотря на стремительное развитие и усложнение ПО для аддитивных технологий, одним из ключевых аспектов его выбора остается обеспечение высокой точности печати. Влияние вибраций и инерции может приводить к различным геометрическим искажениям и снижению качества итогового изделия. В связи с этим современные производители ПО все

больше внимания начинают уделять алгоритмам, направленным на компенсацию этих негативных факторов. Использование современных алгоритмов 3D-печати позволяет минимизировать возможность появления всевозможных дефектов и неточностей, что несомненно отражается на конечном результате.

В современных реалиях, когда 3D-печать становится все более популярной, *Klipper* выделяется как один из наиболее инновационных вариантов программного обеспечения для управления 3D-принтерами. *Klipper* – это прошивка для 3D-принтеров, которая отличается своей гибкостью, высокой производительностью и возможностью тонкой настройки, при этом, предлагая относительно простой и понятный интерфейс пользователя [2].

Klipper представляет пользователю несколько очень полезных алгоритмов, такие как «look-ahead», «minimum cruise ratio» и «input shaping», которые, несомненно, упрощают работу с 3D-печатью. «Look-ahead», дословный

перевод которого звучит, как «предварительный просмотр» предназначен для оптимизации скоростей на поворотах при 3D-печати [3]. Он анализирует последовательные перемещения печатающей головки, оценивая углы между ними, чтобы минимизировать резкие изменения

скорости. Это позволяет избежать лишних замедлений и ускорений, которые увеличивают общее время печати и могут негативно сказаться на качестве изделия, а также обеспечивает точное и гибкое управление движением печатающей головки.



Рис. 1. Изменение скорости при повороте на угол 90 градусов с использованием «look-ahead»

Вторым немаловажным алгоритмом является «*minimum cruise ratio*», который дословно переводится, как «минимальный коэффициент крейсерской скорости». В системе *Klipper* реализован механизм, направленный на сглаживание движений при выполнении коротких «зигзагообразных» перемещений [3]. Его основная задача – снижение вибраций, возникающих в конструкции 3D-принтера, что уменьшает нагрузку на механические элементы и снижает уровень шума во время работы. Частые переходы от ускорения к замедлению могут вызывать нестабильность, поэтому алгоритм увеличивает долю пути, пройденного на крейсерской скорости, за счет снижения максимальной скорости некоторых перемещений. Это обеспечивает более плавное движение печатающей головки.

В дополнение к вышеописанным механизмам оптимизации работы 3D-принтеров, *Klipper* поддерживает алгоритм, известный как «*Input Shaping*». Данный алгоритм представляет собой метод управления открытым контуром, который генерирует управляющий сигнал, способный компенсировать собственные вибрации системы [4]. Для его успешного внедрения требуется провести определенные настройки и измерения, которые позволят адаптировать его к конкретной конфигурации принтера. В дополнение к снижению уровня «эхо», использование *Input Shaping* также способствует уменьшению вибраций и тряски принтера в целом [5]. Это может привести к улучшению надежности работы драйверов шаговых двигателей, что дополнительно повышает общую стабильность и эффективность печати.

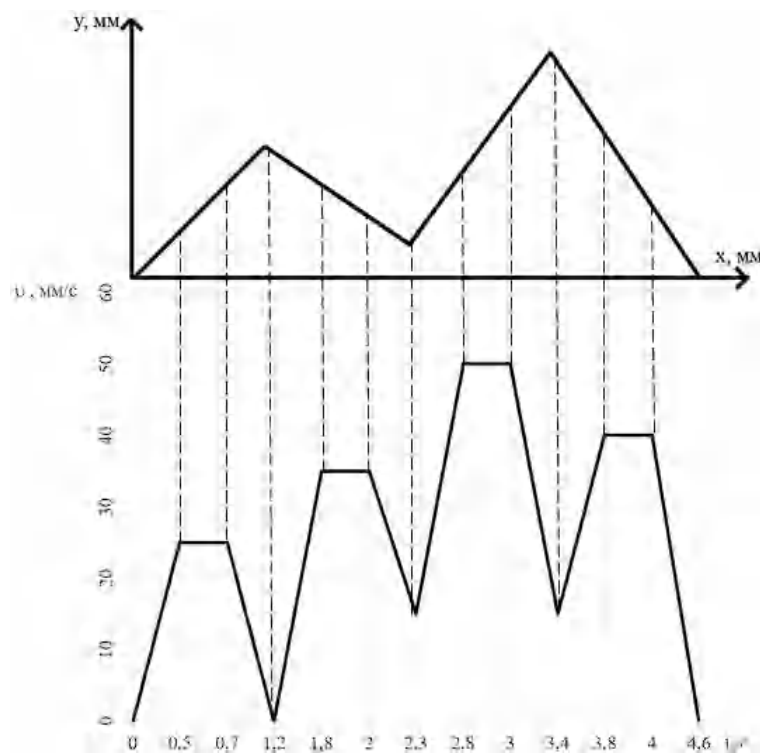


Рис. 2. Изменение скорости при зигзагообразном движении с «*minimum cruise ratio*»

В рамках исследования *Input Shaping* был проведен эксперимент, в ходе которого были напечатаны 3 идентичных тестовых образца, представленных на рисунке 3, с различными конфигурациями алгоритма. Образец под номером 1 был напечатан без использования *Input Shaping*, для того чтобы обеспечить контрольную точку для визуального сравнения. Образцы 2 и 3 были напечатаны с применением технологии *Input Shaping*, но образец под номером 3 был напечатан с базовыми настройками *Input Shaping*, а для печати второго образца была подобрана оптимальная конфигурация алгоритма.

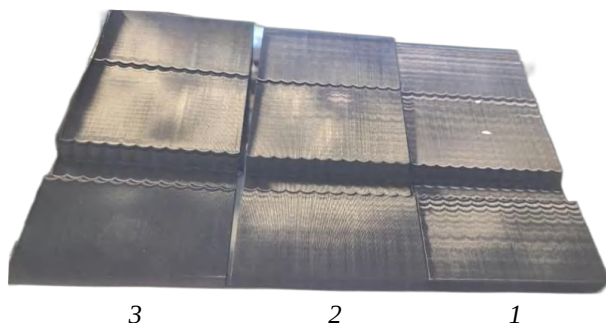


Рис. 3. Образцы, напечатанные в рамках исследования алгоритма *Input Shaping*

Визуальный анализ рисунка демонстрирует, что образцы, напечатанные с использованием

Input Shaping, обладают значительно более гладкой и ровной поверхностью, что наглядно свидетельствует об эффективном подавлении резонансных колебаний и, как следствие, уменьшении дефектов поверхности. При этом, дальнейшая оптимизация конфигурации алгоритма, включающая точную настройку параметров, позволила добиться еще большего улучшения качества, минимизируя возбуждение резонанса и максимально реализуя потенциал *Input Shaping*, что отражается в более равномерном и гладком виде тестового образца и подтверждает, что сочетание *Input Shaping* с точной настройкой параметров печати значительно повышает качество поверхности печатных изделий, обеспечивая не только улучшенный внешний вид, но и более точное соответствие заданным размерам и форме.

Таким образом, *Klipper* представляет собой мощное и удобное программное обеспечение для управления 3D-принтерами, сочетающее гибкость настройки с интуитивным интерфейсом. Алгоритмы «*look-ahead*» и «*minimum cruise ratio*» оптимизируют траектории движения печатающей головки, сокращая время печати за счет минимизации резких остановок и ускорений, что положительно сказывается на качестве изделий. Эксперимент, проведенный с *Input*

Shaping, показал, что использование этого алгоритма значительно улучшает качество поверхности печатаемых изделий, эффективно подавляя резонансные колебания и уменьшая дефекты. Сочетание *Input Shaping* с точной настройкой параметров печати позволяет добиться еще большего улучшения качества, обеспечивая не только улучшенный внешний вид, но и более точное соответствие заданным размерам и форме.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Чудинский, Р. М. Роль и место аддитивных технологий в образовательном процессе / [Электронный ресурс] / Р. М. Чудинский, Н. А. Горбунов // Современные пробле-

мы науки и образования: [сайт]. – URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=32065> (дата обращения: 07.02.2025).

2. Top3DShop / [Электронный ресурс] // Обзор прошивки Klipper для 3D-принтеров: [сайт]. – URL: <https://top3dshop.ru/blog/obzor-proshivki-klipper> (дата обращения: 07.02.2025)

3. Klipper documentation / [Электронный ресурс] // Kinematics: [сайт]. – URL: <https://www.klipper3d.org/Kinematics> (дата обращения: 05.02.2025).

4. Klipper Wiki / [Электронный ресурс] // Resonance Compensation: [сайт]. – URL: <https://klipper.wiki/ru/home/tuning/shaper/> (дата обращения: 05.02.2025).

5. Rec3D / [Электронный ресурс] // Как настроить функцию input shaping в Klipper: [сайт]. – URL: <https://rec3d.ru/rec-wiki/kak-nastroit-funktsiyu-input-shaping-v-klipper/> (дата обращения: 07.02.2025).

УДК 62-791.2

DOI: 10.35211/1990-5297-2025-3-298-81-84

Ф. К. Салех, А. А. Яковлев, И. С. Торубаров

МЕТОДИКА И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ НА ПРОЧНОСТЬ ПЛАСТИКОВЫХ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС С АРМИРОВАНИЕМ

Волгоградский государственный технический университет

E-mail: lkoeleh@gmail.com, yaa_777@mail.ru, is.torubarov@gmail.com

В статье описан метод быстрого тестирования прочности пластиковых зубчатых колес с использованием 3D-печати и непрерывного армирования волокном для повышения прочности. Была разработана 3D-модель зубчатого колеса, которая прошла испытания на износ и усталость при разных уровнях нагрузки. Испытания показали, что армирование углеволокном значительно увеличивает прочность колес при умеренных нагрузках, хотя при высоких нагрузках возможен скол зубьев. В статье также подчеркивается важность автоматизации тестирования для повышения эффективности и точности.

Ключевые слова: 3D-печать, армирование волокном, пластиковые зубчатые колеса, испытание на прочность, FDM-технология, автоматизация тестирования, износ, усталостная прочность

F. K. Saleh, A. A. Yakovlev, I. S. Torubarov

METHODOLOGY AND EQUIPMENT FOR TESTING STRENGTH OF PLASTIC GEARS WITH REINFORCEMENT

Volgograd State Technical University

This article presents a method for quickly testing the strength of plastic gears, focusing on using 3D printing with continuous fiber reinforcement to improve durability. A 3D model of a gear was designed and tested for wear and fatigue under different loads. The tests showed that reinforcing gears with carbon fiber increases their strength, especially under moderate loads. However, gear teeth may fail under higher loads. The study also emphasizes the need for automated testing to improve efficiency and accuracy.

Keywords: 3D printing, fiber reinforcement, plastic gears, strength testing, FDM technology, testing automation, wear, fatigue strength

В данной статье рассматривается использование пластиковых зубчатых колес в механических системах, которые в настоящее время широко распространены благодаря их легкости, низкой стоимости и малому шуму. Однако относительно низкая прочность пластиковых ко-

лес по сравнению с металлическими аналогами ограничивает их использование, особенно при высоких нагрузках, где повреждение зубьев может привести к поломке механизма [1]. Для повышения прочности предлагается метод армирования непрерывным волокном при 3D-пе-

части пластиковых зубчатых колес, технология их производства, а также методы и оборудование для быстрой оценки их прочности.



Рис. 1. Примеры сломанных зубьев и разрушения пластиковой шестерни

На рисунке 1 показано, что зубья наиболее интенсивно изнашиваются на краях, что свидетельствует о высоком трении и нагрузке. Поверхностные дефекты могут указывать на слабую устойчивость материала к механическим повреждениям или усталости. Изменение формы зубьев указывает на повышенные нагрузки, что может повлиять на эффективность передачи крутящего момента.

Все эти признаки подчеркивают важность прочности материала и равномерного распределения нагрузки для долговечности зубчатых колес.

Даже если зубчатое колесо выдерживает начальные нагрузки, то впоследствии может произойти слом зубьев и это требует улучшения материалов или армирования для предотвращения таких разрушений.

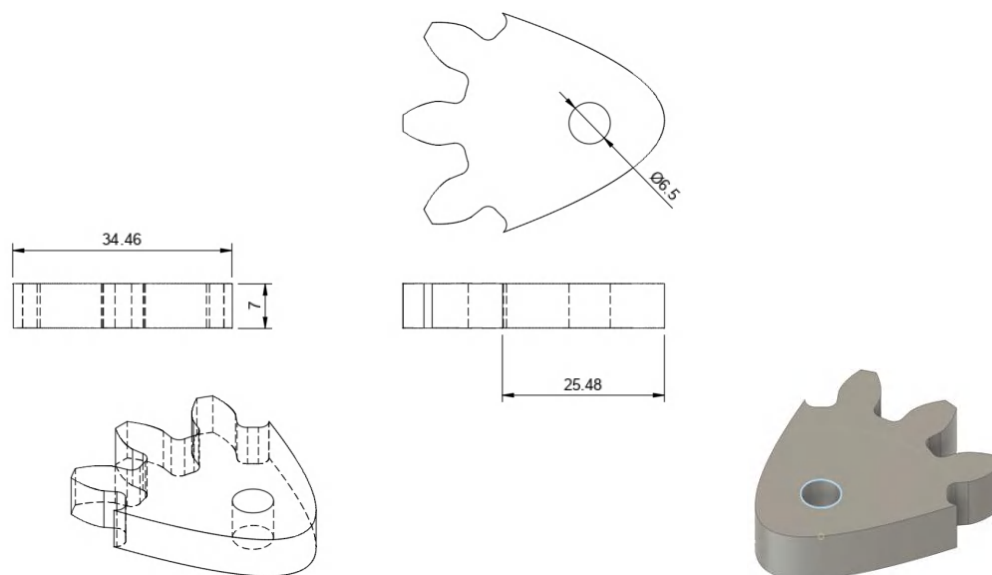


Рис. 2. Сектор зубчатого колеса для испытаний

На рисунке 2 представлен зубчатый сектор с тремя зубьями, включая проекцию на три плоскости и все необходимые размеры для изготовления. Он предоставляет полную информацию для производства и сборки сектора в механизме.

Для испытаний на прочность на разрывной машине ТРМ-С 10 А1 разработана оснастка, состоящая из захвата, конуса и проставки. Их чертежи и 3D-модели представлены на рис. 3–5.

На рисунке 3 показана 3D-модель захвата для удержания сектора зубчатого колеса в испытательной машине.

Захват, изготовленный из ABS-пластика, обладает необходимой прочностью и устойчивостью к деформациям при нагрузках. Его

форма в виде буквы «П» с вертикальными стойками и основанием обеспечивает жесткость. Он оснащен отверстиями для крепления сектора, а также дополнительными отверстиями, необходимыми для крепежных элементов. Это обеспечивает точное удержание сектора и исключает смещения во время тестирования.

Для приложения крутящего момента в 600 Нм разработан конус (рис. 4), имитирующий один зубец сектора шестерни на испытательном стенде. Он обеспечивает точное приложение силы для испытания прочности и долговечности шестерни. Это помогает анализировать механические свойства шестерни в реальных условиях нагрузки.

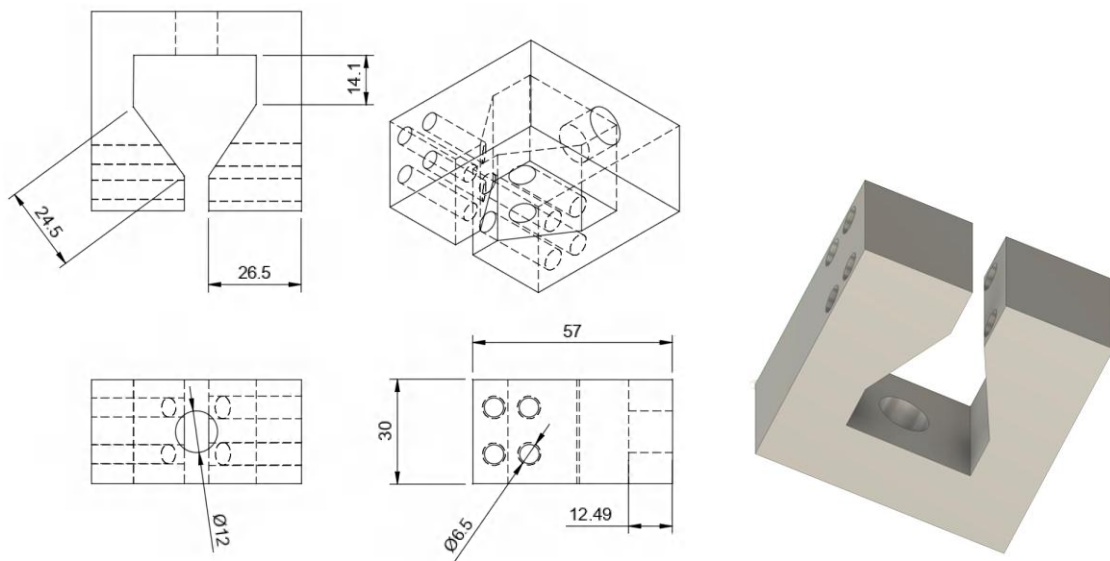


Рис. 3. Захват

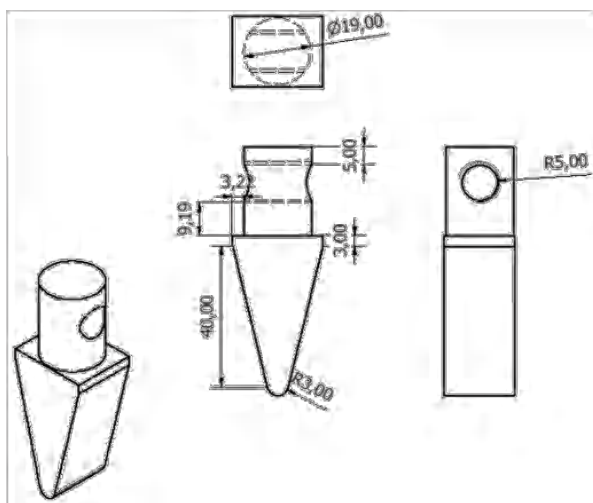


Рис. 4. Конус



Рис. 5. Прокладка

Прокладка (рис. 5) обеспечивает надежную фиксацию сектора шестерни во время испытаний, предотвращая его смещение и улучшая точность результатов.

На рисунке 6 показан зубчатый сектор, подготовленный к производству методом *FDM 3D* печати в программе *STESlicer*.

Как показали предварительные испытания, армирование зубчатого колеса непрерывным волокном повышает прочность и износостойкость зубьев, особенно при высоких нагрузках [2], снижает риск поломки и уменьшает деформацию зубьев, улучшая долговечность и устойчивость к механическим повреждениям.

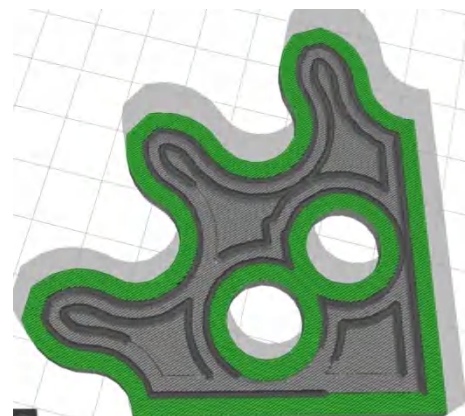
Рис. 6. Зубчатый сектор в программе *STESlicer* с линиями армирования



Рис. 7. Разрывной машине TPM-C 10 A1

Разрывная машина TPM-C 10 A1 показана на рис. 7. С ее помощью прикладываются контролируемые усилия к сектору шестерни, позволяя точно измерять его прочность и сопро-

тивление деформации. Это необходимо для оценки производительности шестерни, ее долговечности и материалов.

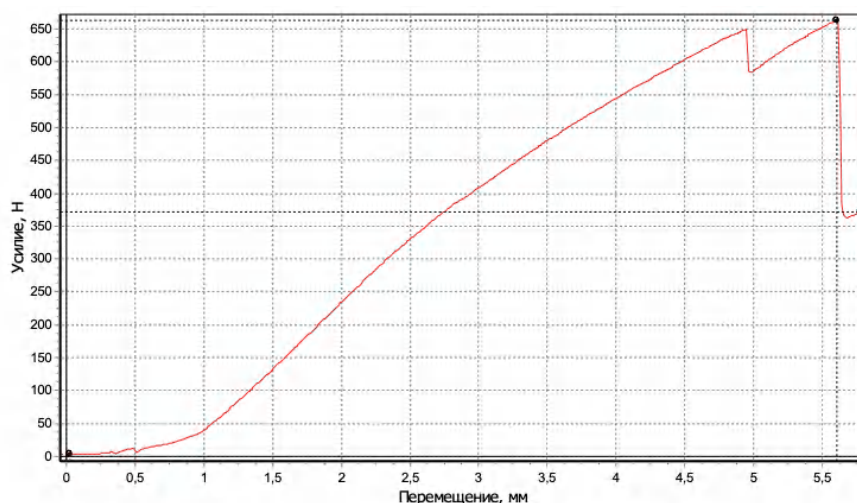


Рис. 8. График результатов испытаний

На рисунке 8 показан график результатов испытаний. График отражает деформацию зубчатого колеса в зависимости от прикладываемого к нему усилия. С его помощью можно оценить реальную прочность пластиковых шестерен с армированием.

Таким образом, предложенный в данной статье метод испытаний пластиковых колес с армированием, полученных путем 3D-печати, позволяет ускорить процесс тестовых испытаний, снизить затраты на их проведение, а также повысить адекватность полученных результатов по сравнению с существующими методами.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Иванов, И. И.* Использование композитов для повышения прочности зубчатых колес / И. И. Иванов, А. А. Петров // *Машиностроения*, 2021. http://www.mashin.ru/eshop/journals/vestnik_mashinostroeniya/
2. *Медунецкий, В. М.* Применение полимерных композиционных материалов в цилиндрических зубчатых колесах / В. М. Медунецкий, В. А. Зенков, М. В. Абрамчук, С. Ю. Перепелкина // *Серия конференций ИП: Материаловедение и инженерия*, том 1100, 2021. DOI: 10.1088/1757-899X/1100/1/012030.
3. *Якуб Луцек.* Обзор методов проектирования и аддитивного производства зубчатых колес / Якуб Луцек // *BiuletynWAT*, том LXX, No 2, 2021. DOI: 10.5604/01.3001.0015.7008.

УДК 681.523.5: 621.791.75

DOI: 10.35211/1990-5297-2025-3-298-85-88

*Я. Ю. Якоби, С. В. Шостенко***РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ПНЕВМОДАТЧИКОВ
ДЛЯ МНОГООСОУВЕТОВАННЫХ СИСТЕМ АВТОМАТИЗАЦИИ
СВАРКИ ТОНКОСТЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ****Волгоградский государственный технический университет**

E-mail: appaa1972@gmail.com, sergejshostenko@yandex.ru

В исследовании рассматриваются первичные струйные пневмопреобразователи щелевого типа, которые применяются при аргонодуговой сварке изделий из тонкого металла. Был проведен анализ статических характеристик пневмопреобразователей. Проведенное исследование статических характеристик щелевых первичных пневматических преобразователей позволяет сделать вывод о перспективности их применения.

Ключевые слова: пневмопреобразователь, тонкостенные изделия, сварка, статические характеристики

*Ya. Yu. Yakobi, S. V. Shostenko***DEVELOPMENT AND RESEARCH OF PNEUMATIC SENSORS
FOR MULTI-AXIS WELDING AUTOMATION SYSTEMS
FOR THIN-WALLED STRUCTURES****Volgograd State Technical University**

The study examines the primary jet pneumatic transformers of the slot type, which are used in argon arc welding of thin metal products. The analysis of static characteristics of pneumatic transducers was carried out. The conducted study of the static characteristics of slot primary pneumatic converters allows us to conclude that their application is promising.

Keywords: pneumatic converter, thin-walled products, welding, static characteristics

В современной промышленности находят применение тонкостенные конструкции, собираемые методом контактной и бесконтактной сварки. К таким изделиям относятся тонкостенные трубы, мембраны, сильфоны и другие.

Наиболее распространенным методом для создания таких изделий является аргонодуговая сварка с отбортовкой, которая используется для финишной сборки. Этот способ позволяет сваривать тонкостенные конструкции из нержавеющей стали, меди и латуни. Для их изготовления требуется высокая точность сварки, достигаемая за счет использования датчиков, контролирующих положение детали. Анализ показал, что наиболее универсальными в использовании являются пневматические датчики за счет осуществления бесконтактного контроля положения, простоты конструкции и высокой точности.

При выборе первичных преобразователей контроля положения стыка при сварке тонкостенных изделий рассматривались различные альтернативные решения (индуктивные, фотоэлектрические, электроконтактные и телевизионные датчики). Однако их применение существенно ограничено особенностями сварки тон-

костенных изделий. Предпочтительным представляется использование пневматических первичных преобразователей контроля положения. Были рассмотрены несколько видов пневматических первичных преобразователей, гораздо в меньшей степени в литературе рассмотрены преобразователи типа сопло-заслонка щелевого типа. Малые габариты измерительных сопел таких устройств позволяют применять их для контроля положения изделий шириной до 0,1 мм [1]. Учитывая малый объем научной информации о таких устройствах, было решено провести их исследование с целью определения параметров преобразователей для использования в разрабатываемой следящей системе управления положением сварочного инструмента.

Исследуемый пневмодатчик включает в себя входной цилиндрический дроссель 1 постоянного сечения и выходной переменный дроссель 2 щелевого типа. При исследовании определялись достижимые диапазоны измерения и чувствительность. В расчетах принималось допущение, что изменение параметров состояния воздуха в междроссельной камере происходит по изотермическому закону.

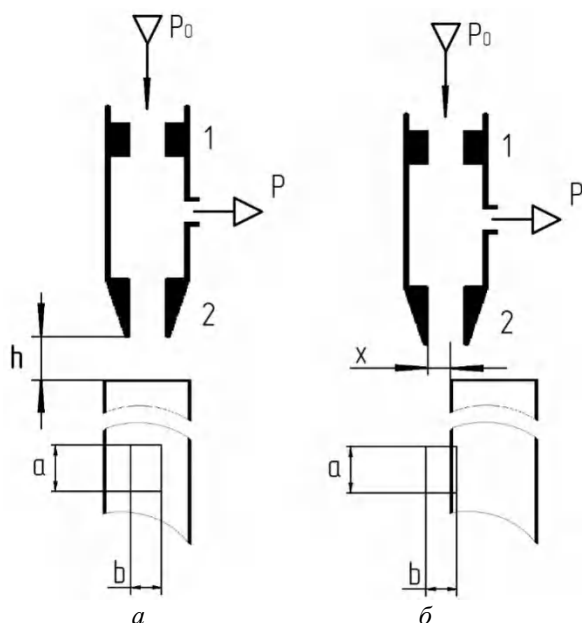


Рис. 1. Схемы измерений:
а – схема осевого смещения стыка; б – схема поперечного смещения стыка

Для схемы а (рис. 1) исследовалась зависимость изменения давления P на выходе преобразователя от величины измерительного зазора h ($P = f(h)$). В статике, при допущении, что истечение воздуха в атмосферу происходит только через боковой зазор между измерительным соплом и заслонкой, данная зависимость может быть получена из допущения о равенстве расходов газа через входной и выходной дроссели.

Для первичного преобразователя с прямоугольным в сечении измерительным соплом имеем [2]:

$$h = \frac{\alpha_1 \cdot d^2}{8\alpha_2(a+b)} \sqrt{\frac{P_0(P_0 - P)}{P(P - P_a)}}, \quad (1)$$

где α_1 , α_2 – коэффициенты расхода воздуха через входной и выходной дроссели соответственно; a , b – размеры измерительного сопла в сечении; P_0 – давление питания; P_a – атмосферное давление; P – давление на выходе пневмодатчика; $\alpha_1=0,8$; $\alpha_2=0,3$; $a = 2$ мм; $b = 0,4$ мм; пределы изменения $P = 0,11$ МПа... P_0 .

При исследовании передаточных характеристик проводилось варьирование величинами d и P_0 . Исследуемая комбинация параметров представлена в таблице.

Параметры для исследования

Номер исследуемой комбинации	Диаметр входного дросселя d , мм	Давление питания P_0 , МПа
1	0,2	0,18
2	0,2	0,2
3	0,2	0,22
4	0,4	0,18
5	0,4	0,2
6	0,4	0,22
7	0,6	0,18
8	0,6	0,2
9	0,6	0,22
10	0,8	0,18
11	0,8	0,2
12	0,8	0,22
13	1	0,18
14	1	0,2
15	1	0,22
16	1	0,23
17	1	0,24
18	1	0,25

На рисунке 2 приведено семейство зависимостей $P = f(h)$, рассчитанных по формуле (1), а на рис. 1, а представлена схема измерения. Позиции кривых соответствуют номеру исследуемой комбинации в соответствии с таблицей.

Анализ полученных зависимостей показал, что значительное влияние на крутизну характеристики при данных размерах дросселей оказывает параметр P_0 . Датчик обеспечивает высокую чувствительность (до 550 Па/мкм для случая 18 таблицы). Протяженность линейных участков не превышает значений 100 мкм. Анализ зависимостей показал, что щелевые преобразователи могут работать на измерительных зазорах до 0,1 мм, что вполне удовлетворяет требованиям к преобразователю контроля положения стыка при дуговой сварке.

Датчик пневматической следящей системы должен отслеживать не только осевые, но и поперечные смещения стыка кромок. Поэтому необходимо было провести исследования работы таких устройств при поперечном смещении отслеживаемого стыка кромок и постоянном осевом зазоре.

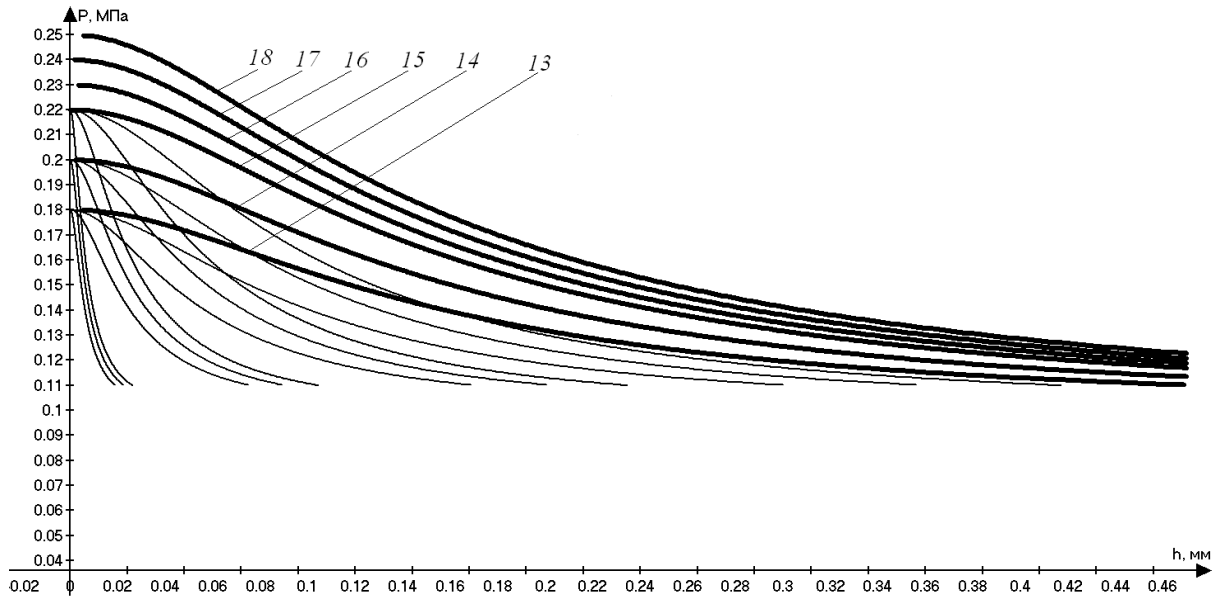


Рис. 2. Статические характеристики $P = f(h)$ щелевого пневмодатчика

Для расчетов мы воспользовались формулой из источника [1]. Изменение давления в междроссельной камере пневматического датчика зависит от величины перемещения заслонки и подчиняется закону:

$$P = \frac{P_0}{1 + \left(\frac{\alpha_1}{\alpha_2} \right)^2 \times \frac{16}{\pi^2 d^2} \times \{ h[2(b-x) + a] + ax \}^2}, \quad (2)$$

где h – осевой зазор; x – контролируемое смещение кромки заслонки в перпендикулярном к оси сопла датчика направлении.

Значения констант в формуле (2) выбирались следующими:

$$P_0 = 0,25 \text{ МПа}; d = 1 \text{ мм}; \alpha_1 = 0,8;$$

$$\alpha_2 = 0,3; a = 2 \text{ мм}; b = 0,4 \text{ мм}.$$

Исследовалась зависимость $P = f(x)$ при различных фиксированных значениях зазора h (исследовались случаи $h_1 = 40$, $h_2 = 90$, $h_3 = 140$ мкм). На рис. 2 приведено семейство характеристик $P = f(h)$, вычисленных по формуле (2) для трех указанных значений h , а на рис. 1, б представлена схема измерения. Обозначения элементов на рис. 1, б аналогичны схеме по рис. 1, а.

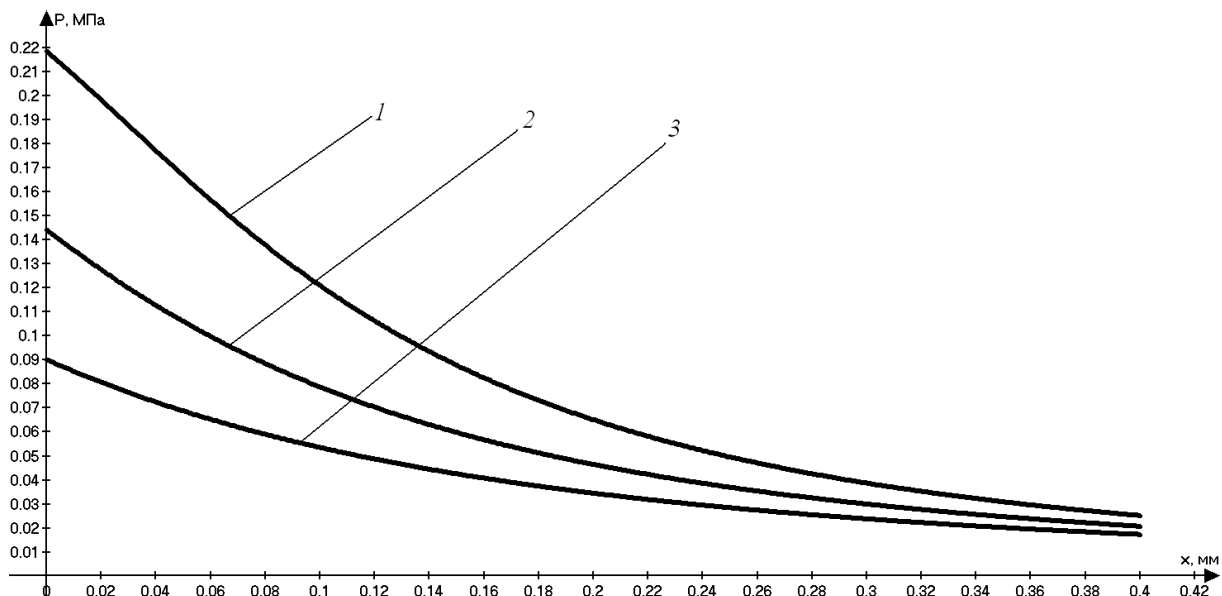


Рис. 3. Статические характеристики $P = f(x)$ пневмодатчика при поперечном смещении кромки

Установлено, что существенное влияние на полученные теоретические зависимости оказывает влияние параметр α_2 , который зависит от формы щелевого сопла и величины зазора h . Приведенные характеристики имеют линейные участки значительной протяженности (для случая 1 в диапазоне перемещений от 0 до 80 мкм относительное отклонение от линейности не превышает 2 %). Величина измерительного зазора при выбранной комбинации параметров не оказывает влияния на чувствительность пневматического датчика, что позволяет выделить сигнал поперечного перемещения заслонки из общего сигнала преобразователя. Чувствительность датчика составляет около 1008 Па/мкм (случай 1 на рис. 3), что вполне удовлетворяет требованиям к датчику поперечного смещения кромок при дуговой сварке. Ввиду малых размеров проходного сечения щелевого сопла

предлагаемый пневматический датчик можно подключить к струйному усилителю через маломощный точный повторитель любого типа.

Проведенное исследование статических характеристик щелевых первичных пневматических преобразователей позволяет заключить о перспективности их применения при построении многокоординатных систем управления положением инструмента при сварке тонкостенных изделий в защитных газах (аргон, гелий).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Исследование пневматических щелевых преобразователей для слежения за кромкой изделия / М. Б. Диперштейн, А. И. Сутин, С. В. Шостенко ; ВолгГТУ. – Волгоград, 1995. – 10 с.
2. Котова, В. Г. Автоматическое управление движением сварочной горелки по линии стыка / В. Г. Котова, А. Ч. Галицкий, Г. А. Акопян // Приборы автоматики. – 1970. – С. 32–39.

Ответственный за выпуск Жанна Сергеевна **ТИХОНОВА**

Оригинал-макет и электронная версия издания
подготовлены редакционно-издательским отделом
Издательства ВолгГТУ

Корректura **Н. Н. Кваши**
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)

Учредитель:
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Волгоградский государственный технический университет» (ВолгГТУ)

Адрес редакции и издателя: 400005, г. Волгоград, просп. В. И. Ленина, 28.
Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ)
Телефон: гл. редактор – (8442) 24-80-00
E-mail: ianovakov@vstu.ru

Темплан 2025 г. Поз. № 2ж. Дата выхода в свет 20.03.2025 г. Формат 60 x 84 1/8.
Бумага офсетная. Гарнитура Times. Печать офсетная. Усл. печ. л. 10,23. Уч.-изд. л. 10,97.
Тираж 100 экз. Свободная цена. Заказ № 120.

Отпечатано в типографии Издательства ВолгГТУ
400005, г. Волгоград, просп. В. И. Ленина, 28, корп. 7.