

**МИНОБРНАУКИ РОССИИ**  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«Тверской государственный технический университет»**  
(ТвГТУ)

**ВЕСТНИК**  
**ТВЕРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО**  
**ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА**

**Серия «Технические науки»**

**Научный рецензируемый журнал**  
**№ 4 (12), 2021**

**Print ISSN 2658-5030**

Тверь 2021

**Учредитель: ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет»**

**Главный редактор:** Болотов А.Н., д.т.н., профессор ТвГТУ

**Заместители главного редактора:**

Измайлов В.В., д.т.н., профессор ТвГТУ

Яблонев А.Л., д.т.н., доцент ТвГТУ

Семенов Н.А., д.т.н., профессор ТвГТУ

**Ответственный секретарь:** Афанасьева Л.Е., к.ф.-м.н., доцент ТвГТУ

**Члены редакционной коллегии:**

*По направлению «Машиностроение и машиноведение»*

Гершман И.С., д.т.н., профессор, ВНИИЖТ

Горохов Д.Б., д.т.н., доцент БрГУ

Горячева И.Г., академик РАН, д.ф.-м.н., профессор, ИПМех РАН

Иванов А.С., д.т.н., профессор МГТУ им. Н.Э. Баумана

Козырева Л.В., д.т.н., доцент ТвГТУ

Матлин М.М., д.т.н., профессор, ВолгГТУ

Солдатенков И.А., д.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник ИПМех РАН

Хопин П.Н., д.т.н., профессор МАИ

Шоркин В.С., д.ф.-м.н., профессор ОГУ имени И.С. Тургенева

Шустер Л.Ш., д.т.н., профессор УГАТУ

*По направлению «Транспортное, горное и строительное машиностроение»*

Березовский Н.И., д.т.н., профессор БНТУ, Республика Беларусь

Головин К.А., д.т.н., профессор ТулГУ

Горлов И.В., д.т.н., доцент ТвГТУ

Кантович Л.И., д.т.н., профессор НИТУ «МИСиС»

Керопян А.М., д.т.н., доцент НИТУ «МИСиС»

Кондратьев А.В., д.т.н., профессор ТвГТУ

Рахутин М.Г., д.т.н., доцент НИТУ «МИСиС»

*По направлению «Информатика, вычислительная техника и управление»*

Бурдо Г.Б., д.т.н., профессор ТвГТУ

Голенков В.В., д.т.н., профессор БГУИР, Республика Беларусь

Мешалкин В.П., академик РАН, д.т.н., РХТУ им. Д.И. Менделеева

Палюх Б.В., д.т.н., профессор ТвГТУ

Шпрехер Д.М., д.т.н., профессор ТулГУ

Язенин А.В., д.ф.-м.н., профессор ТвГУ

Адрес редакции: 170026, Тверь, наб. Афанасия Никитина, д. 22.

E-mail: [vestnik\\_tstu\\_tekh@mail.ru](mailto:vestnik_tstu_tekh@mail.ru)

Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки» публикует научные статьи и краткие обзоры по направлениям: 05.02.00 Машиностроение и машиноведение; 05.05.00 Транспортное, горное и строительное машиностроение; 05.13.00 Информатика, вычислительная техника и управление. Журнал выходит 4 раза в год.

Зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций. Регистрационный номер: ПИ № ФС77-74321 от 19 ноября 2018 года. Индексируется в базе данных Российского индекса научного цитирования (РИНЦ).

Перепечатка материалов из журнала возможна при письменном согласии с редакцией, при этом ссылка на журнал обязательна.

© ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 2021

## СОДЕРЖАНИЕ

### МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

<i>Измайлов В.В., Новоселова М.В.</i> Электроконтактные свойства материала, содержащего тугоплавкие компоненты. Многокомпонентный материал .....	5
<i>Измайлов В.В., Новоселова М.В.</i> Интегральная оценка электроконтактных свойств композиционных материалов с использованием функции желательности Харрингтона .....	14
<i>Мигранов А.М., Мигранов М.Ш., Колосова Н.В., Ахметова Э.З.</i> Инновационные материалы и покрытия с эффектом адаптации при резании металлов .....	23
<i>Афанасьева Л.Е., Кобозев И.Ю.</i> Влияние внешнего электрического поля на глубину проплавления при лазерной сварке сталей.....	32

### ТРАНСПОРТНОЕ, ГОРНОЕ И СТРОИТЕЛЬНОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

<i>Яблонев А.Л., Щербакова Д.М.</i> Обоснование параметров установки сопла торфяной пневмоупорочной машины над подстилающей поверхностью залежи....	38
<i>Фомин К.В.</i> Анализ влияния неточности расположения и размеров резцов на рабочем органе торфяного фрезерующего агрегата на частотные свойства момента сопротивления.....	46
<i>Горлов И.В.</i> Комплексная диагностика узлов трения торфяных машин.....	57

### ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

<i>Бурдо Г.Б., Болотов А.Н.</i> Механизм машинного обучения в системах автоматизированного проектирования.....	66
<i>Зоренко Д.А.</i> Моделирование газолазерной резки высоколегированной стали .....	76
<i>Жаббаров И.М., Юдин А.В.</i> Особенности применения датчиков для мониторинга параметров дуги установки синтеза углеродных нанотрубок плазмохимическим методом .....	82
<i>Пузырев Н.М., Мартынов Д.В., Барбашинова Н.Б., Емцев А.С.</i> Оценка опасных и вредных производственных факторов в эргатических системах методом дисперсионного анализа.....	91
<b>Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». Оформление статей. Правила для авторов.....</b>	<b>98</b>

## CONTENTS

### MECHANICAL ENGINEERING AND MACHINE SCIENCE

<i>Izmailov V.V., Novoselova M.V.</i> Electric contact properties of material containing refractory components. Multicomponent material.....	5
<i>Izmailov V.V., Novoselova M.V.</i> Integral evaluation of electrocontact properties of composite materials using Harrington desirability function.....	14
<i>Migranov A.M., Migranov M.Sh., Kolosova N.V., Akhmetova E.Z.</i> Innovative materials and coatings with the effect of adaptation when cutting metals.....	23
<i>Afanasieva L.E., Kobozev I.Yu.</i> Influence of external electric field on the depth of penetration in laser welding of steels.....	32

### TRANSPORT, MINING AND CONSTRUCTION MACHINERY

<i>Yablonev A.L., Scherbakova D.M.</i> Justification of parameters for installing the nozzle of a peat pneumatic harvester above the underlaying surface.....	38
<i>Fomin K.V.</i> Analysis of the influence of inaccuracy of arrangement and height of cutters on the working body of a peat milling machine on the frequency properties of the resistance torque.....	46
<i>Gorlov I.V.</i> Comprehensive diagnostics of friction units of peat machines.....	57

### INFORMATICS, COMPUTER FACILITIES AND MANAGEMENT

<i>Burdo G.B., Bolotov A.N.</i> Machine learning mechanism in automated design systems.....	66
<i>Zorenko D.A.</i> Simulation of gas laser cutting of high-alloy steel.....	76
<i>Zhabbarov I.M., Yudin A.V.</i> Application features of the sensors for monitoring the arc parameters of the carbon nanotube synthesis plant by the plasma chemical method.....	82
<i>Puzyrev N.M., Martynov D.V., Barbashinova N.B., Yemtsev A.S.</i> Assessment of hazardous and harmful production factors in ergatic systems by the method of dispersion analysis.....	91
<b>Instructions for authors of the journal «Bulletin of the Tver State Technical University». Series «Engineering». Manuscript requirements.....</b>	<b>98</b>

# МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

УДК 621.31

## ЭЛЕКТРОКОНТАКТНЫЕ СВОЙСТВА МАТЕРИАЛА, СОДЕРЖАЩЕГО ТУГОПЛАВКИЕ КОМПОНЕТЫ. МНОГОКОМПОНЕНТНЫЙ МАТЕРИАЛ

В.В. ИЗМАЙЛОВ, д-р техн. наук, М.В. НОВОСЕЛОВА, канд. техн. наук

Тверской государственной технической университет,  
170026, Тверь, наб. Аф. Никитина, д. 22, e-mail: iz2v@tvcom.ru

© Измайлов В.В., Новоселова М.В., 2021

Представлены результаты исследования основных электроконтактных характеристик композиционных порошковых материалов на медной основе, содержащих мелкодисперсный алмазный порошок и тугоплавкий компонент в виде порошка молибдена, вольфрама, хрома, твердого сплава ВК6М. Удельное электросопротивление, твердость и электроэрозионный износ исследованных образцов представлены в абсолютных величинах и в сравнении с аналогичными характеристиками эталонного материала – электротехнической меди – в зависимости от состава композита, полярности образца (образец – анод и образец – катод) и взаимного расположения электродов. С помощью функции желательности Харрингтона выбран композит с оптимальным сочетанием эксплуатационных характеристик.

*Ключевые слова:* композиционный алмазосодержащий медный материал, тугоплавкие компоненты, электропроводность, электроэрозионный износ, функция желательности Харрингтона.

**DOI: 10.46573/2658-5030-2021-4-5-13**

### ВВЕДЕНИЕ

Материалы на основе меди составляют основную часть применяемых электродных материалов [1]. Широкое использование меди в качестве материала для различных электрических контактов обусловлено удачным сочетанием ее физических свойств, определяющих эксплуатационные характеристики электроконтактных соединений.

Для контактных соединений, подверженных электроэрозионному изнашиванию под воздействием импульсного разряда, существует два критерия оценки их электроэрозионной стойкости. Если импульсный разряд принимает форму искрового, рекомендуется так называемый критерий Палатника [2]:

$$\Pi = T_{\text{пл}} \sqrt{c_{\text{уд}} \lambda \gamma},$$

где  $T_{\text{пл}}$  – температура плавления материала;  $c_{\text{уд}}$  – удельная теплоемкость;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности;  $\gamma$  – плотность. По величине этого критерия медь заметно уступает только вольфраму, практически не уступает молибдену и на 30 % превосходит серебро.

Для дуговой формы импульсного разряда рекомендуется другой критерий [2]:

$$R_{\text{эп}} = \frac{c_{\text{уд}} T_{\text{пл}}}{k_{\text{в}} U'_{\text{э}}},$$

где  $k_{\text{в}}$  – коэффициент выброса материала;  $U'_{\text{э}}$  – эквивалентное приэлектродное падение напряжения. Поскольку величины  $k_{\text{в}}$  и  $U'_{\text{э}}$  для типичных электроконтактных материалов отличаются незначительно, основным критерием электроэрозионной стойкости материала становится произведение теплоемкости на температуру плавления. По величине этого произведения медь лишь на 27 % уступает вольфраму, почти вдвое превосходя серебро. Кроме всего прочего, надо учесть хорошую обрабатываемость меди и ее относительно невысокую стоимость.

Тем не менее электроконтактные характеристики меди можно улучшить, создавая, например, на ее основе порошковые композиционные материалы. Достоинством порошковых композиций является практически аддитивное сочетание свойств компонентов. Вводя в композиционный материал на основе меди небольшое количество тугоплавких компонентов, можно значительно повысить его электроэрозионную стойкость без существенного снижения проводимости. В качестве таких компонентов используют тугоплавкие металлы, их карбиды и другие тугоплавкие соединения [3–5].

Цель данной статьи – провести сравнительные испытания на электроэрозионную износостойкость многокомпонентных композиционных материалов на основе меди и рекомендовать материал (материалы) с оптимальным сочетанием эксплуатационных характеристик.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом данного исследования были выбраны композиты, предназначенные для разрывных электрических контактов и изготовленные по порошковой технологии на основе медной матрицы с добавлением тугоплавких компонентов. В качестве последних использовали углерод в виде мелкодисперсного алмазного порошка и металлические порошки (молибден, вольфрам, хром, твердый сплав ВК6М).

Исследуемые образцы композитов получены прессованием смеси порошков с массовым содержанием алмазного порошка 2 % и металлического порошка 2 %, остальное – медь. Компактирование заготовок образцов производилось под давлением 700 МПа при комнатной температуре в цилиндрической пресс-форме. Дальнейшее спекание образцов проводилось в вакууме ( $10^{-4}$  мм рт. ст.) в течение 1 ч при температуре 1 000 °С ( $\pm 10$  °С). Плотность изготовленных образцов составляла  $\gamma = 8,7$  г/см<sup>3</sup>, пористость – 12–15 %.

Так как плотности компонентов исследуемых композиционных материалов значительно различаются, то массовые концентрации компонентов не всегда дают полное представление о составе материала. Объемные доли алмазного и металлического порошков в образцах составляют примерно 4 и 1 % соответственно.

Сравнительные испытания образцов на электроэрозионную износостойкость проводили на установке [6] в режиме импульсного разряда. В качестве эталона для сравнительных испытаний использовали монолитный образец из меди марки М1.

Образцы из исследуемых материалов контактировали с контрольным образцом – зондом из вольфрамовой проволоки диаметром 1 мм. Источником коммутируемой

электрической энергии в установке служит емкостный накопитель, максимальная величина коммутируемого заряда составляет 66 мКл за одну коммутацию. Продолжительность испытаний – 100 циклов коммутации.

Объем изношенного материала измеряли по диаметру и глубине кратера. Диаметр определяли под микроскопом, глубину – с помощью часового индикатора с погрешностью 0,01 мм. За нулевой уровень отсчета глубины кратера принимали исходную поверхность образца, а образовавшиеся вокруг кратера наплывы материала не учитывали. Таким образом, измеряли общий объемный износ как результат испарения и переноса материала.

Как известно, величина электроэрозионного износа зависит от полярности электрода, поэтому испытания каждого материала проводили при положительной полярности образца (анод) и при отрицательной (катод). Дополнительно образцы были испытаны при различном взаимном расположении электродов (контрообразец располагался над образцом и наоборот). Дело в том, что на коэффициент выброса расплавленного металла из зоны контакта  $k_v$  влияют величина и соотношение различных сил: газодинамических, электромагнитных, сил поверхностного натяжения. Очевидно, что направление гравитационных сил – вглубь расплавленного материала или наружу – будет влиять на величину коэффициента выброса. Поскольку в условиях наших испытаний в основном изнашивается анод, то важно учитывать его расположение относительно направления гравитационных сил.

Измерение удельного сопротивления опытных образцов производилось четырехзондовым методом [7]. Зонды были изготовлены из вольфрама, расстояние между ними равнялось 1 мм.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты испытаний материалов представлены в табл. 1 в виде объемной удельной эрозии  $I_V = V/q$ , которая рассчитывается как отношение абсолютной величины объемного износа  $V$  к величине коммутируемого заряда  $q$ . Другой часто используемой в литературе формой представления электроэрозионного износа является массовая удельная эрозия  $I_m = m/q$ , где  $m$  – масса изношенного материала. Объемная и массовая удельные эрозии связаны очевидным соотношением  $I_m = I_V \cdot \gamma$ . Значения удельного электросопротивления  $\rho$  и удельной эрозии  $I_V$  приведены с доверительным интервалом при 95%-й доверительной вероятности. Твердость индентирования  $H$  соответствует нагрузке на индентор 10 Н.

Таблица 1. Состав и характеристики исследованных образцов

Характеристика	Состав материала					
	Cu+2%C	Cu+2%C+ +2%Mo	Cu+2%C+ +2%W	Cu+2%C+ +2%Cr	Cu+2%C+ +2%VK6M	Медь М1 (эталон)
$H$ , МПа	592					716
$\rho$ , $10^{-8}$ Ом·м	2,2±0,3	2,3±0,1	2,2±0,2	2,3±0,1	3,0±0,2	1,8
$I_V$ , $10^{-11}$ м <sup>3</sup> /Кл; образец – анод, внизу	3,7±0,2	4,0±0,2	2,2±0,9	3,8±0,6	2,9±0,6	6,1±0,1
$I_V$ , $10^{-11}$ м <sup>3</sup> /Кл; образец – катод, внизу	1,3±0,7	1,3±0,2	1,0±0,7	1,3±0,2	1,2±0,4	0,6±0,3
$I_V$ , $10^{-11}$ м <sup>3</sup> /Кл образец – анод, вверху	1,4±0,2	1,7±0,5	0,6±0,3	1,4±0,1	1,0±0,5	3,7±1,2
$I_V$ , $10^{-11}$ м <sup>3</sup> /Кл; образец – катод, вверху	0,2±0,0	0,2±0,0	0,7±0,3	0,8±0,2	0,8±0,2	1,1±0,3

Анализ данных, представленных в табл. 1, позволяет сделать вывод о том, что исследованные композиты несущественно уступают эталонному материалу (меди) по величине твердости и проводимости. Твердость композитов составляет примерно 80 % от твердости монолитного медного эталонного образца, проводимость (за исключением образца, содержащего ВК6М) – около 80 % от проводимости эталона. Для сравнения: проводимость чистого вольфрама составляет 30 % от проводимости меди, платины – 16 %. При этом и тот и другой широко используются в электрических контактах. В то же время электроэрозионная износостойкость исследованных композитов существенно (в 2–5 раз) превышает износостойкость меди.

Для более наглядного сравнения характеристик исследованных композитов и эталона в табл. 2 приведены результаты испытаний в виде относительных величин, где  $H/H_{Cu}$ ,  $\sigma/\sigma_{Cu}$  и  $I/I_{Cu}$  – относительные твердость, электропроводность и удельная эрозия исследованных материалов в сравнении с эталоном.

Таблица 2. Состав и характеристики исследованных образцов в сравнении с эталоном

Характеристика	Состав материала				
	Cu+2%С	Cu+2%С+ +2%Мо	Cu+2%С+ +2%W	Cu+2%С+ +2%Cr	Cu+2%С+ +2%ВК6М
$H/H_{Cu}$	0,83				
$\sigma/\sigma_{Cu}$	0,82	0,78	0,82	0,78	0,6
$I/I_{Cu}$ образец и эталон – анод (катод), внизу	0,61 (2,2)	0,66 (2,2)	0,36 (1,7)	0,62 (2,2)	0,48 (2,0)
$I/I_{Cu}$ образец и эталон – анод (катод), сверху	0,38 (0,18)	0,46 (0,18)	0,16 (0,64)	0,38 (0,73)	0,27 (0,73)

Для электроконтактного материала, подверженного электроэрозионному изнашиванию, выгодно сочетание малого удельного сопротивления и малого удельного износа, поэтому за критерий сравнения исследованных материалов можно принять произведение относительных величин  $(\rho/\rho_{Cu}) \cdot (I/I_{Cu})$ . Значения этого произведения представлены на рис. 1 и 2. По величине принятого критерия оптимальным является материал Cu+2%С+2%W.

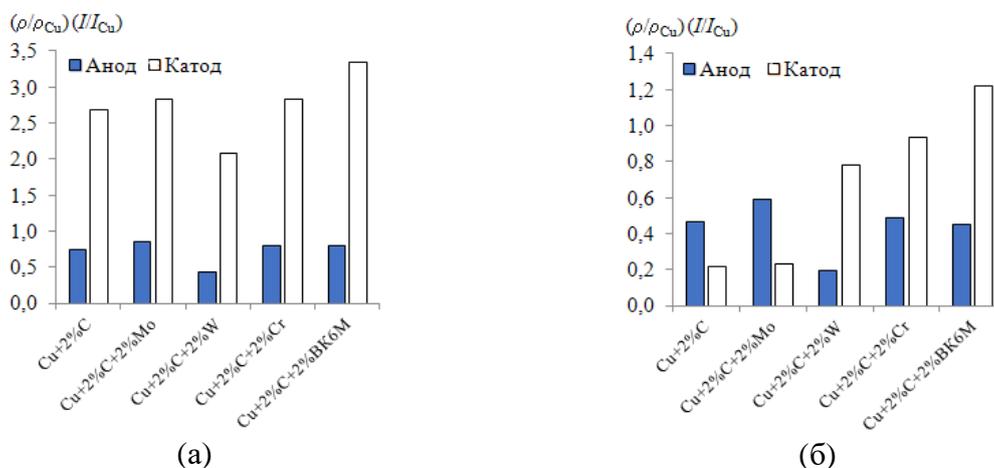


Рис. 1. Электроконтактные характеристики исследованных материалов в зависимости от полярности при различном взаимном расположении электродов: образец внизу (а); образец сверху (б)

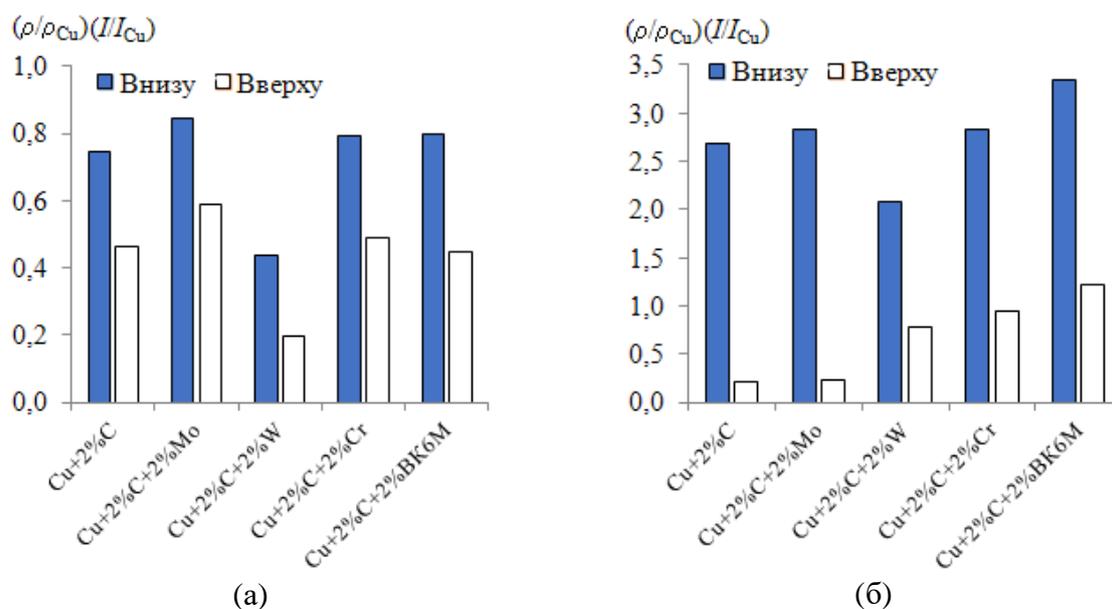


Рис. 2. Электроконтактные характеристики исследованных материалов в зависимости от взаимного расположения электродов при различной полярности: образец в качестве анода (а); образец в качестве катода (б)

Для более объективного сравнения испытываемых материалов используем так называемую функцию желательности Харрингтона [8], применяемую в самых различных по тематике научных исследованиях – от медицинских и экологических до экономических и исследований космической техники [9–14]. Функция желательности имеет вид

$$d = \exp[-\exp(-y')], \quad (1)$$

где  $d$  – количественная оценка желательности;  $y'$  – преобразованные безразмерные значения частных показателей. Обычно используется линейное преобразование  $y' = b_0 + b_1 y$ , где  $y$  – абсолютное значение показателя.

Шкала желательности  $0 \leq d \leq 1$  содержит пять диапазонов (табл. 3).

Таблица 3. Оценки по шкале желательности

Оценка желательности	Интервалы значений функции желательности
Отлично	0,80–1,00
Хорошо	0,63–0,80
Удовлетворительно	0,37–0,63
Плохо	0,20–0,37
Очень плохо	0,00–0,20

Обобщенная функция желательности рассчитывается на основании частных функций

$$D = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n d_i}. \quad (2)$$

Поскольку твердость всех исследованных материалов практически одинакова (см. табл. 1), частные функции желательности рассчитывались для двух показателей –

удельной проводимости  $\sigma = 1/\rho$  и удельной износостойкости  $I = 1/I_v$ . И в том и в другом случае желательны максимально возможные значения показателей.

Для перевода абсолютных значений проводимости и износостойкости (см. табл. 1) в безразмерные величины необходимо определить соответствующие значения коэффициентов  $b_0$  и  $b_1$ . Для этого воспользуемся рекомендациями, приведенными в работе [8]. Выберем в качестве эталонов два распространенных электроконтактных материала – медь и молибден. В качестве параметров  $y$  используем проводимость и износостойкость выбранных материалов (табл. 4). Назначим каждому из значений параметров  $y$  соответствующие значения функций желательности  $d$ . Назначенные значения  $d_1$  и  $d_2$  выбраны субъективно (это неизбежно при использовании функции желательности), но в целом мы считаем, что они соответствуют логике табл. 3. Зная два значения каждого из параметров  $y$  и два соответствующих значения функции желательности  $d$ , определяем для каждого из параметров коэффициенты  $b_0$  и  $b_1$ .

Таблица 4. Характеристики эталонных образцов

Материал	Абсолютные значения параметров		Соответствующие значения функций желательности	
	$\sigma$ , МСм	$I$ , $10^{11}$ Кл/м <sup>3</sup>	$d_1$	$d_2$
Медь	55	0,16	0,9	0,37
Молибден	18	1,1	0,37	0,8

Затем по формулам (1) и (2) рассчитываем значения частных и обобщенной функций желательности. Результаты расчетов приведены в табл. 5.

Таблица 5. Значения частных и обобщенной функций желательности

Функция желательности	Состав материала				
	Cu+2%С	Cu+2%С+ +2%Мо	Cu+2%С+ +2%W	Cu+2%С+ +2%Cr	Cu+2%С+ +2%ВК6М
$d_1$ (проводимость)	0,82	0,80	0,82	0,80	0,66
$d_2$ (износостойкость)	0,43	0,42	0,53	0,43	0,47
$D$ (обобщенная)	0,59	0,58	0,66	0,58	0,56

Наибольшее из приведенных в табл. 5 значений функции желательности наблюдается у материала Cu+2%С+2%W. Оно соответствует оценке «хорошо». Таким образом, подтверждается сделанный выше вывод о том, что данный материал обладает оптимальным для электроконтактного материала сочетанием свойств.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Эксплуатационные свойства меди как материала для электроконтактных соединений можно существенно улучшить, создавая на ее основе композиционные материалы с помощью технологии порошковой металлургии. При этом практически полностью сохраняется основное достоинство меди как электротехнического материала – ее высокая проводимость, но одновременно в несколько раз повышается электроэрозионная износостойкость. Для выбора материала с оптимальным сочетанием эксплуатационных свойств удобно использовать так называемую функцию желательности. Она позволяет не только провести сравнение материалов по нескольким параметрам в комплексе, но и оценить соответствие реальных характеристик данного материала ожидаемым (желательным) величинам. По величине

обобщенной функции желательности можно заключить, что из испытанных нами электроконтактных материалов оптимальным сочетанием электроконтактных характеристик обладает композит состава  $Cu+2\%C+2\%W$ .

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Оглезнева С.А., Ханов А.М., Оглезнев Н.Д. Исследование относительной эрозионной стойкости электродов-инструментов из композиционных порошковых материалов на основе меди // *Металлообработка*. 2016. № 5 (95). С. 16–20.
2. Буткевич Г.В., Белкин Г.С., Ведешенков Н.А., Жаворонков М.А. Электрическая эрозия сильноточных контактов и электродов. М.: Энергия, 1978. 256 с.
3. Измайлов В.В., Новоселова М.В. Электроконтактные свойства материала, содержащего тугоплавкие компоненты. Композит медь – карбид хрома // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2021. № 2 (10). С. 15–20.
4. Измайлов В.В., Новоселова М.В. Электроконтактные свойства материала, содержащего тугоплавкие компоненты. Композит медь – карбид вольфрама // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2021. № 3 (11). С. 5–11.
5. Измайлов В.В., Новоселова М.В. Электроконтактные свойства материала, содержащего тугоплавкие компоненты. Алмаз-карбидный композит на основе меди // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2021. № 3 (11). С. 12–19.
6. Измайлов В.В., Новоселова М.В., Левыкин Д.А. Исследование эрозионной износостойкости электроконтактных материалов в режиме импульсного разряда. *Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел и деталей машин: Межвуз. сб. науч. тр.* Тверь: ТГТУ, 2005. С. 112–116.
7. Радьков А.В., Малаханов А.А. Методы измерения удельного сопротивления полупроводниковых материалов. *Актуальные вопросы технических наук: Материалы V Междунар. науч. конф.* (г. Санкт-Петербург, февраль 2019 г.). СПб.: Свое издательство, 2019. С. 18–24.
8. Использование функции желательности Харрингтона при решении оптимизационных задач химической технологии / сост. С.Л. Ахназарова, Л.С. Гордеев. М.: РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2003. 76 с.
9. Самохвалов Ю.Я., Бурба О.И. Оценка эффективности научных и научно-технических проектов на основе обобщенной функции Харрингтона // *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2018. № 4. С. 77–85.
10. Опекунов А.Ю., Опекунова М.Г. Интегральная оценка загрязнения ландшафта с использованием функции желательности Харрингтона // *Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 7. Геология. География*. 2014. № 4. С. 101–113.
11. Любушин Н.П., Брикач Г.Е. Использование обобщенной функции желательности Харрингтона в многопараметрических экономических задачах // *Экономический анализ: теория и практика*. 2014. № 18 (370). С. 2–10.
12. Пичкалев А.В. Обобщенная функция желательности Харрингтона для сравнительного анализа технических средств // *Исследования наукограда*. 2012. № 1 (1). С. 25–28.
13. Харитонов Е.А., Михайлов О.В. Функция желательности и возможности ее применения для оценки научной деятельности в национальных исследовательских университетах // *Вестник технологического университета*. 2016. Т. 19. № 14. С. 142–145.

14. Королева С.В. Практические аспекты использования функции желательности в медико-биологическом эксперименте // *Современные проблемы науки и образования*. 2011. № 6. С. 71. URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=5270> (дата обращения: 26.09.2021).

**Для цитирования:** Измайлов В.В., Новоселова М.В. Электроконтактные свойства материала, содержащего тугоплавкие компоненты. Многокомпонентный материал // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2021. № 4 (12). С. 5–13.

## **ELECTRIC CONTACT PROPERTIES OF MATERIAL CONTAINING REFRACTORY COMPONENTS. MULTICOMPONENT MATERIAL**

V.V. IZMAILOV, Dr. Sc., M.V. NOVOSELOVA, Cand. Sc.

Tver State Technical University, 22, Af. Nikitin emb.,  
170026, Tver, Russian Federation, e-mail: iz2v@tvcom.ru

The results of a study of the main electrical contact characteristics of composite powder materials on a copper basis containing fine diamond powder and a refractory component in the form of a powder of molybdenum, tungsten, chromium, and a hard alloy ВК6М are presented. The electrical resistivity, hardness, and electrical discharge wear of the investigated samples are presented in absolute values and in a comparison with similar characteristics of the reference material – electrical copper – depending on the composition of the material, the polarity of the sample (sample – anode and sample – cathode) and the relative position of the electrodes. Using the Harrington desirability function, the composite with the optimum combination of operational properties is selected.

*Keywords:* composite diamond-containing copper material, refractory components, electrical conductivity, electroerosive wear, Harrington desirability function.

### **REFERENCES**

1. Oglezneva S.A., Khanov A.M., Ogleznev N.D. Investigation of the relative erosion resistance of electrodes-tools made of composite powder materials based on copper. *Metalloobrabotka*. 2016. No. 5 (95), pp. 16–20. (In Russian).
2. Butkevich G.V., Belkin G.S., Vedeshenkov N.A., Zhavoronkov M.A. *Elektricheskaya eroziya silnotochnykh kontaktov i elektrodov* [Electrical erosion of high current contacts and electrodes]. Moscow: Energiya, 1978. 256 p.
3. Izmailov V.V., Novoselova M.V. Electrical contact properties of a material containing refractory components. Composite copper – chromium carbide. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya «Tekhnicheskiye nauki»*. 2021. No. 2 (10), pp. 15–20. (In Russian).
4. Izmailov V.V., Novoselova M.V. Electrical contact properties of a material containing refractory components. Composite copper – tungsten carbide. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya «Tekhnicheskiye nauki»*. 2021. No. 3 (11), pp. 5–11. (In Russian).
5. Izmailov V.V., Novoselova M.V. Electrical contact properties of a material containing refractory components. Copper-based diamond-carbide composite. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya «Tekhnicheskiye nauki»*. 2021. No. 3 (11), pp. 12–19. (In Russian).

*Вестник Тверского государственного технического университета.  
Серия «Технические науки». № 4 (12), 2021*

6. Izmailov V.V., Novoselova M.V., Levykin D.A. Investigation of erosion wear resistance of electrical contact materials in a pulsed discharge mode. *Mekhanika i fizika protsessov na poverkhnosti i v kontakte tverdykh tel i detaley mashin: mezhvuz. sb. nauch. tr.* Tver: TSTU, 2005, pp. 112–116. (In Russian).

7. Radkov A.V., Malakhanov A.A. Methods of measuring the resistivity of semiconductor materials. *Topical issues of technical sciences: materials of the V International. scientific. conf. (St. Petersburg, February 2019)*. SPb.: Svoye izdatelstvo, 2019, pp. 18–24. (In Russian).

8. Ispolzovaniye funktsii zhelatelnosti Kharringtona pri reshenii optimizatsionnykh zadach khimicheskoy tekhnologii [Using the Harrington desirability function when solving optimization problems of chemical technology] / sost. S.L. Akhnazarova, L.S. Gordeev. Moscow: RKHTU im. D.I. Mendeleyeva, 2003. 76 p.

9. Samokhvalov Yu.Ya., Burba O.I. Evaluation of the effectiveness of scientific and scientific-technical projects based on the generalized Harrington function. *Sistemy upravleniya, navigatsii i svyazi*. 2018. No. 4, pp. 77–85. (In Russian).

10. Opekunov A.Yu., Opekunova M.G. Integral assessment of landscape pollution using the Harrington desirability function. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Seriya 7. Geologiya. Geografiya*. 2014. No 4, pp. 101–113. (In Russian).

11. Lyubushin N.P., Brikach G.E. The use of the generalized Harrington desirability function in multiparameter economic problems. *Ekonomicheskiiy analiz: teoriya i praktika*. 2014. No. 18 (370), pp. 2–10. (In Russian).

12. Pichkalev A.V. Harrington's generalized desirability function for comparative analysis of technical means. *Issledovaniya naukoigrada*. 2012. No. 1 (1), pp. 25–28. (In Russian).

13. Kharitonov E.A., Mikhailov O.V. Desirability function and the possibility of its application for the assessment of scientific activity in national research universities. *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta*. 2016. V. 19. No 14, pp. 142–145. (In Russian).

14. Koroleva S.V. Practical aspects of using the desirability function in a biomedical experiment. *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya*. 2011. No. 6, pp. 71. URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=5270> (date accessed: 26.09.2021). (In Russian).

Поступила в редакцию/received: 04.05.2021; после рецензирования/revise: 03.06.2021;  
принята/accepted: 15.07.2021

## **ИНТЕГРАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ЭЛЕКТРОКОНТАКТНЫХ СВОЙСТВ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФУНКЦИИ ЖЕЛАТЕЛЬНОСТИ ХАРРИНГТОНА**

В.В. ИЗМАЙЛОВ, д-р техн. наук, М.В. НОВОСЕЛОВА, канд. техн. наук

Тверской государственной технической университет,  
170026, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, д. 22, e-mail: iz2v@tvcom.ru

© Измайлов В.В., Новоселова М.В., 2021

Показаны возможности применения обобщенной функции желательности Харрингтона в качестве интегрального показателя качества электроконтактных композиционных порошковых материалов. Расчет обобщенной функции желательности произведен для ряда материалов на основе меди с учетом основных эксплуатационных характеристик: удельной проводимости, удельной электроэрозионной износостойкости и твердости. Данная функция является универсальным безразмерным критерием, не зависящим от размерности входящих в него величин. По наибольшему значению функции желательности выделены образцы с оптимальным комплексом эксплуатационных свойств. Таковыми оказались образцы с большим процентным содержанием меди, износостойкость которых повышена введением небольшого количества тугоплавких компонентов – мелкодисперсных алмазов и хрома.

*Ключевые слова:* электроконтактный материал, порошковые композиты, медь, тугоплавкие компоненты, проводимость, электроэрозионная износостойкость, твердость, функция желательности.

**DOI: 10.46573/2658-5030-2021-4-14-22**

### **ВВЕДЕНИЕ**

Оптимальный выбор конструкционных и функциональных материалов – непременное условие надежной и эффективной работы современных технических устройств.

Одно из основных направлений современного материаловедения – получение материалов с заданными свойствами. В этом плане наиболее перспективными являются композиционные материалы (КМ), полученные методами порошковой металлургии. Порошковым технологиям практически нет альтернативы, например, в таком направлении, как изготовление электроконтактных материалов (ЭКМ). Подобные материалы позволяют сохранить в композите индивидуальные свойства компонентов и получить требуемое сочетание свойств, порой антагонистических, чего невозможно достичь в традиционных сплавах.

Номенклатура современных электроконтактных устройств, их конструктивное исполнение, области применения и условия эксплуатации весьма разнообразны. В зависимости от этого могут меняться и требования к материалам конкретных электроконтактных устройств. Тем не менее многие требования универсальны для всех ЭКМ. Так, единым требованием является высокая проводимость и малое контактное электросопротивление. К материалам для разрывных контактов добавляются требования высокой электроэрозионной износостойкости и стойкости к свариванию. В любых электроконтактных соединениях в той или иной степени присутствует механическое изнашивание. Стойкость материалов к механическому изнашиванию можно оценить по величине твердости материала: чем выше твердость, тем меньше механическая составляющая износа контакт-деталей.

В некоторых случаях для целенаправленного выбора ЭКМ предложены критерии, сочетающие в себе физические свойства материала, наиболее важные в конкретных условиях. Так, для материалов контактов, подверженных электроэрозионному изнашиванию при воздействии импульсного разряда, применяется критерий Палатника [1]:

$$\Pi = T_{\text{пл}} \sqrt{\lambda c_{\text{уд}} \gamma}, \quad (1)$$

где  $T_{\text{пл}}$  – температура плавления материала;  $\lambda$  – теплопроводность;  $c_{\text{уд}}$  – удельная теплоемкость;  $\gamma$  – плотность. Данный критерий рекомендуется в основном при искровой форме импульсного разряда.

Если в контакте преобладает дуговая форма импульсного разряда, рекомендуется другой критерий [1]:

$$R_{\text{эп}} = \frac{c_{\text{уд}} T_{\text{пл}}}{k_{\text{в}} U'_{\text{э}}}, \quad (2)$$

где  $k_{\text{в}}$  – коэффициент выброса материала;  $U'_{\text{э}}$  – эквивалентное приэлектродное падение напряжения.

Для однокомпонентных ЭКМ применение критериев, выраженных уравнениями (1) и (2), обычно не вызывает затруднений. Входящие в уравнения величины, характеризующие физические свойства ЭКМ, можно найти в справочных материалах или научных публикациях. Однако для многокомпонентных ЭКМ, в том числе композиционных, входящие в формулы величины, как правило, неизвестны. Теоретические расчеты этих величин на основании свойств отдельных компонентов не всегда достоверны, а экспериментальное определение невозможно ввиду огромного количества сочетаний компонентов.

Кроме того, критерии (1) и (2) характеризуют только одну из основных эксплуатационных характеристик ЭКМ – электроэрозионную износостойкость, не учитывая проводимость и механические свойства материала.

В качестве ЭКМ, например, широко применяются КМ на основе меди. Основные достоинства меди как ЭКМ – высокая проводимость (в этом плане медь уступает только серебру), хорошая обрабатываемость и относительно невысокая стоимость. К недостаткам меди как ЭКМ относятся склонность к образованию поверхностных пленок с высоким сопротивлением, а также невысокие механические свойства и электроэрозионная износостойкость. Так, по электроэрозионной износостойкости медь в несколько раз уступает таким ЭКМ, как вольфрам и молибден.

Можно повысить механическую прочность, электроэрозионную и механическую износостойкость меди введением в медный КМ тугоплавких компонентов в виде чистых металлов или их химических соединений (карбидов, боридов, силицидов), углерода, графита [2–8].

Однако платой за повышение указанных электроконтактных свойств является снижение электропроводности материала, приводящее к повышенному нагреву контакт-деталей и, как следствие, снижению надежности электроконтактного соединения. Таким образом, при выборе состава ЭКМ приходится искать компромиссное решение, позволяющее получить приемлемые значения нескольких антагонистических свойств.

Примером подобного подхода могут служить работы [9–12], в которых проведено сравнение ЭКМ по совокупности эксплуатационных характеристик в виде

произведения ( $\rho \cdot I_V$ ), где  $\rho$  – удельное сопротивление, измеряемое в Ом·м;  $I_V$  – удельный объемный износ (объем удаленного при разряде материала в расчете на 1 Кл коммутируемого заряда), измеряемый в м<sup>3</sup>/Кл. Недостатком такого критерия является отсутствие в его составе параметра, характеризующего механические свойства ЭКМ. Кроме того, предпочтительна универсальная безразмерная форма критерия, не зависящая от размерности входящих в него величин.

В данной работе показана возможность применения так называемой функции желательности Харрингтона в качестве количественного критерия выбора состава композиционного ЭКМ с оптимальным комплексом основных эксплуатационных характеристик. Универсальная безразмерная функция желательности Харрингтона находит широкое применение при решении оптимизационных задач в самых различных по тематике научных исследованиях – от медицинских и экономических до исследований химической технологии и космической техники [13–19].

### ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ

Функция желательности имеет вид

$$d = \exp[-\exp(-y')], \quad (3)$$

где  $d$  – количественная оценка желательности;  $y'$  – преобразованные безразмерные значения частных показателей. Обычно используется линейное преобразование

$$y' = b_0 + b_1 y, \quad (4)$$

где  $y$  – абсолютное значение показателя;  $b_0$  и  $b_1$  – коэффициенты. Значения коэффициентов  $b_0$  и  $b_1$  определяются на основании решения системы двух линейных уравнений (4), записанных для двух абсолютных значений соответствующего показателя  $y$  согласно рекомендациям работы [13].

Обобщенная функция желательности рассчитывается на основании частных функций

$$D = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n d_i}. \quad (5)$$

В нашем случае, частные функции желательности рассчитывались для трех показателей (параметров)  $y$ : удельной проводимости  $\sigma = 1/\rho$ ; удельной объемной износостойкости  $I = 1/I_V$ ; твердости  $H$ . Во всех случаях желательны максимально возможные значения показателей.

### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Состав исследованных материалов [9–12] приведен в табл. 1. В составе указано массовое содержание тугоплавких компонентов в процентах. Присутствие углерода в КМ означает, что при изготовлении образцов в качестве одного из исходных компонентов использовался мелкодисперсный порошок технических алмазов с размером частиц 8–12 мкм. Исходные компоненты в виде мелкодисперсных порошков подвергались прессованию и спеканию. Давление прессования составляло 700 МПа, спекание происходило в вакууме ( $10^{-4}$  мм рт. ст.) при температуре  $T_{сп}$  (табл. 1). Пористость образцов – 12–15 %.

Твердость образцов измерялась методом индентирования, а именно алмазным индентором со сферической вершиной (под нагрузкой 10 Н). Проводимость образцов

ЭКМ измерялась четырехзондовым методом. Испытания на электроэрозионную износостойкость проводились в режиме импульсного разряда. Контробразцом служил вольфрамовый зонд диаметром 1 мм. Характеристиками износостойкости были выбраны удельный объемный износ  $I_V$  и удельная объемная износостойкость И.

Таблица 1. Массив исследованных материалов

Номер	$T_{сп}$ , °C	Состав материала	Номер	$T_{сп}$ , °C	Состав материала
1	1 000	Cu+2%Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub>	25	950	Cu+2%C+2%Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub>
2	950		26	900	
3	900		27	850	
4	850		28	950	
5	1 000	Cu+5%Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub>	29	900	Cu+2%C+2%W <sub>2</sub> C
6	950		30	850	
7	900		31	1 000	Cu+2%C
8	850		32	1 000	Cu+2%C+2%Mo
9	1 000	Cu+10%Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub>	33	1 000	Cu+2%C+2%W
10	950		34	1 000	Cu+2%C+2%Cr
11	900		35	1 000	Cu+2%C+2%BK6M
12	850		36	1 000	<b>Cu+5%C</b>
13	1 000	<b>37</b>	<b>950</b>		
14	950	38	900		
15	900	39	850		
16	850	Cu+2%W <sub>2</sub> C	40	950	Cu+10%C
17	1 000		41	900	
18	950		42	850	
19	900		43	800	Cu+20%Cr
20	850	Cu+5%W <sub>2</sub> C	<b>44</b>	<b>1 100</b>	<b>Cu+40%Cr</b>
21	1 000		<b>45</b>	<b>1 100</b>	<b>Cu+50%Cr</b>
22	950		<b>46</b>	<b>1 100</b>	<b>Cu+60%Cr</b>
23	900		47	1 100	Cu+80%Cr
24	850				

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В качестве эталонов для построения шкалы желательности были выбраны распространенные ЭКМ – медь и молибден. Каждому из трех показателей эталонных материалов были назначены значения функций желательности (табл. 2), выбранные из пяти диапазонов [13]: 1–0,8 – отлично (допустимый и очень хороший уровень); 0,8–0,63 – хорошо (допустимый и хороший); 0,63–0,37 – удовлетворительно (допустимый и достаточный); 0,37–0,2 – плохо (недопустимый); 0,2–0 – очень плохо (неприемлемый).

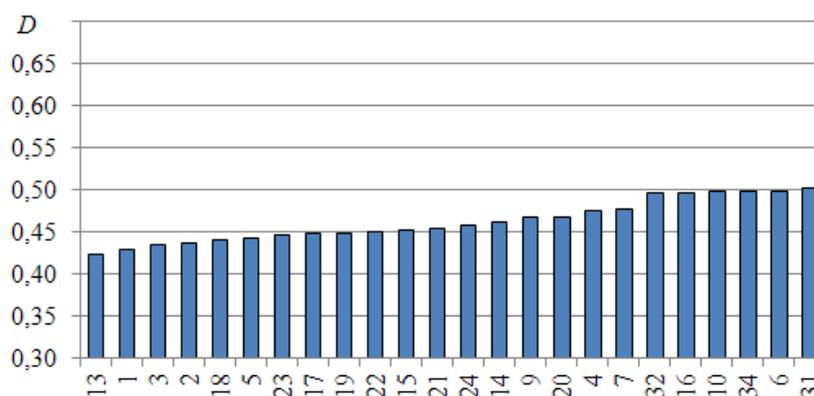
Таблица 2. Характеристики эталонных образцов

Параметры	Абсолютные значения $y$		Соответствующие значения функций желательности $d$		Обобщенная функция желательности $D$	
	Медь	Молибден	Медь	Молибден	Медь	Молибден
$\sigma$ , МСм/м	55	18	0,95	0,70	0,51	0,73
$I$ , $10^{11}$ Кл/м <sup>3</sup>	0,16	1,1	0,37	0,80		
$H$ , МПа	716	1600	0,37	0,70		

Медь характеризуется высокой проводимостью, уступая по этому критерию только серебру. Проводимость технической меди составляет примерно 95 % от проводимости серебра [20]. В то же время электроэрозионная износостойкость меди низкая (см. табл. 2).

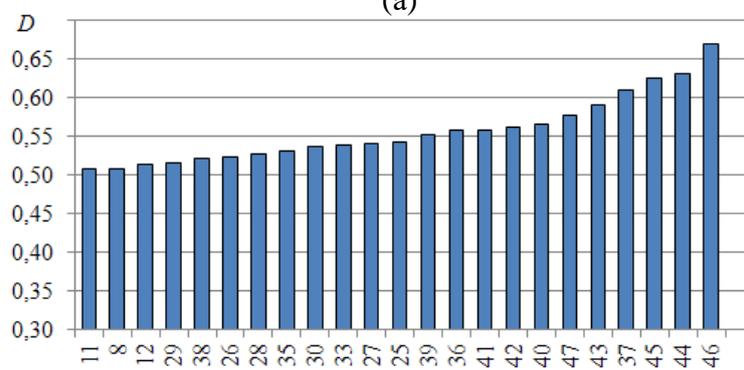
Молибден обладает относительно высоким удельным сопротивлением (примерно в 3 раза выше, чем у меди), но является одним из лидеров по электроэрозионной стойкости среди чистых металлов. По этому критерию он незначительно уступает только вольфраму, превосходя в несколько раз медь и серебро [20, 21]. К достоинствам молибдена можно отнести также стойкость к свариванию и достаточно высокую твердость.

Результаты расчетов обобщенной функции желательности по формуле (5) для исследованных материалов (см. табл. 1) приведены на рисунке.



Порядковый номер в массиве (см. табл. 1)

(а)



Порядковый номер в массиве (см. табл. 1)

(б)

Распределение ЭКМ по значениям обобщенной функции желательности: начало гистограммы (а); продолжение (б)

Из рисунка видно, что все исследованные образцы ЭКМ попадают в диапазон значений функции желательности, соответствующий оценке «удовлетворительно» и более высоким оценкам ( $D > 0,37$ ). Наибольшее значение обобщенной функции желательности ( $D > 0,6$ ) имеют образцы (в табл. 1 выделены жирным шрифтом) с большим процентным содержанием меди, износостойкость которых повышена введением небольшого количества тугоплавких компонентов – мелкодисперсных алмазов и хрома. Наименьшее значение обобщенной функции желательности соответствует карбидосодержащим образцам.

При этом, как следует из табл. 1 и рисунка, значение функции желательности зависит не только от состава, но и от технологических параметров изготовления ЭКМ.

Абсолютные значения обобщенной функции желательности свидетельствуют о возможности улучшения эксплуатационных характеристик композиционных ЭКМ по сравнению с исследованными. Из трех выбранных параметров на обобщенную функцию желательности наибольшее влияние оказывает величина электроэрозионной износостойкости (коэффициент детерминации  $R^2 \approx 0,82$ , т.е. на 82 % значения обобщенной функции желательности определяются величиной фактора износостойкости). В направлении повышения электроэрозионной износостойкости целесообразно продолжить поиски оптимального состава композиционных ЭКМ для разрывных контактов, работающих в условиях преобладания электроимпульсного изнашивания.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Несмотря на некоторую субъективность описанного метода, его успешное применение в различных естественно-научных, технических и гуманитарных приложениях позволяет говорить о нем как простом, наглядном и гибком инструменте оптимизации состава многокомпонентных ЭКМ. Включение дополнительных параметров оптимизации и придание им различного статистического веса дают возможность учесть особенности назначения и конкретных условий эксплуатации электроконтактного соединения.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Буткевич Г.В., Белкин Г.С., Ведешенков Н.А., Жаворонков М.А. Электрическая эрозия сильноточных контактов и электродов. М.: Энергия, 1978. 256 с.
2. Измайлов В.В., Гершман И.С., Новоселова М.В., Харитонов Е.О. Порошковые материалы для электрических контактов // *Материаловедение*. 2007. № 8. С. 22–28.
3. Пименова Н.В. Разработка и исследование композиционного материала Cu-Cr для электрических контактов вакуумных дугогасительных камер // *Вестник МГТУ им. Г.И. Носова*. 2008. № 2. С. 66–69.
4. Измайлов В.В., Дроздова Е.И., Черногорова О.П., Потапова И.Н., Новоселова М.В., Екимов Е.А. Электроконтактные свойства композиционного материала с медной матрицей, армированной сверхупругим твердым углеродом // *Металлы*. 2015. № 3. С. 45–50.
5. Зеер Г.М., Зеленкова Е.Г., Белецкий В.В., Николаев С.В., Кожурин А.Н., Кучинский М.Ю., Григорьева О.А. Микроструктура и свойства электроконтактного материала Cu-(ZnO/TiO<sub>2</sub>) // *Журнал технической физики*. 2015. Т. 85. № 12. С. 88–93.
6. Еремина М.А., Ломаева С.Ф., Паранин С.Н., Демаков С.Л., Елсуков Е.П. Влияние способа компактирования на структуру и свойства объемных композитов Cu + Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> // *Физика металлов и материаловедение*. 2016. Т. 117. № 5. С. 530–537.

7. Еремина М.А., Трифонов И.С., Ломаева С.Ф., Тарасов В.В., Паранин С.Н., Заяц С.В. Структура и износостойкость нанокompозитов Cu-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> // *Физическая мезомеханика*. 2016. Т. 19. № 6. С. 107–115.

8. Измайлов В.В., Новоселова М.В. Электроконтактные свойства композиционного алмазосодержащего медного материала // *Все материалы. Энциклопедический справочник*. 2020. № 5. С. 25–29.

9. Измайлов В.В., Новоселова М.В. Электроконтактные свойства материала, содержащего тугоплавкие компоненты. Композит медь – карбид хрома // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2021. № 2 (10). С. 15–20.

10. Измайлов В.В., Новоселова М.В. Электроконтактные свойства материала, содержащего тугоплавкие компоненты. Композит медь – карбид вольфрама // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2021. № 3 (11). С. 5–11.

11. Измайлов В.В., Новоселова М.В. Электроконтактные свойства материала, содержащего тугоплавкие компоненты. Алмаз-карбидный композит на основе меди // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2021. № 3 (11). С. 12–19.

12. Измайлов В.В., Новоселова М.В. Электроконтактные свойства материала, содержащего тугоплавкие компоненты. Многокомпонентный материал // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2021. № 4 (12). С. 5–13.

13. Использование функции желательности Харрингтона при решении оптимизационных задач химической технологии / сост. С.Л. Ахназарова, Л.С. Гордеев. М.: РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2003. 76 с.

14. Самохвалов Ю.Я., Бурба О.И. Оценка эффективности научных и научно-технических проектов на основе обобщенной функции Харрингтона // *Системы управління, навігації та зв'язку*. 2018. № 4. С. 77–85.

15. Опекунов А.Ю., Опекунова М.Г. Интегральная оценка загрязнения ландшафта с использованием функции желательности Харрингтона // *Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 7. Геология. География*. 2014. № 4. С. 101–113.

16. Любушин Н.П., Брикач Г.Е. Использование обобщенной функции желательности Харрингтона в многопараметрических экономических задачах // *Экономический анализ: теория и практика*. 2014. № 18 (370). С. 2–10.

17. Пичкалев А.В. Обобщенная функция желательности Харрингтона для сравнительного анализа технических средств // *Исследования наукограда*. 2012. № 1 (1). С. 25–28.

18. Харитонов Е.А., Михайлов О.В. Функция желательности и возможности ее применения для оценки научной деятельности в национальных исследовательских университетах // *Вестник Технологического университета*. 2016. Т. 19. № 14. С. 142–145.

19. Королева С.В. Практические аспекты использования функции желательности в медико-биологическом эксперименте // *Современные проблемы науки и образования*. 2011. № 6. С. 71. URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=5270> (дата обращения: 26.09.2021).

20. Мышкин Н.К., Кончиц В.В., Браунович М. Электрические контакты. Долгопрудный: Интеллект, 2008. 560 с.

21. Справочник по расчету и конструированию контактных частей сильноточных электрических аппаратов / Н.М. Адоньев, В.В. Афанасьев, В.В. Борисов [и др.]. Л.: Энергоатомиздат, 1988. 384 с.

**Для цитирования:** Измайлов В.В., Новоселова М.В. Интегральная оценка электроконтактных свойств композиционных материалов с использованием функции желательности Харрингтона // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2021. № 4 (12). С. 14–22.

## INTEGRAL EVALUATION OF ELECTROCONTACT PROPERTIES OF COMPOSITE MATERIALS USING HARRINGTON DESIRABILITY FUNCTION

V.V. IZMAILOV, Dr. Sc., M.V. NOVOSELOVA, Cand. Sc.

Tver State Technical University, 22, Af. Nikitin emb.,  
170026, Tver, Russian Federation, e-mail: iz2v2@mail.ru

The possibilities of using the overall Harrington desirability function as an integral indicator of the quality of electrocontact composite powder materials are shown. The calculation of the overall desirability function was performed for a number of copper-based materials, taking into account the main operational characteristics: specific conductivity, specific electrical discharge wear resistance and hardness. This function is universal dimensionless criterion that does not depend on the dimensions of the quantities included in it. According to the highest value of the desirability function, the samples with the optimal complex of operational properties were selected. These turned out to be samples with a high percentage of copper, the wear resistance of which was increased by the introduction of a small amount of refractory components – fine diamonds and chromium.

*Keywords:* electrical contact material, powder composites, copper, refractory components, conductivity, electroerosive wear resistance, hardness, desirability function.

### REFERENCES

1. Butkevich G.V., Belkin G.S., Vedeshenkov N.A., Zhavoronkov M.A. Elektricheskaya eroziya silnotochnykh kontaktov i elektrodov [Electrical erosion of high current contacts and electrodes]. Moscow: Energiya, 1978. 256 p.
2. Izmailov V.V., Gershman I.S., Novoselova M.V., Kharitonov E.O. Powder materials for electrical contacts. *Materialovedeniye*. 2007. No. 8, pp. 22–28. (In Russian).
3. Pimenova N.V. Development and research of a Cu-Cr composite material for electrical contacts of vacuum interrupting chambers. *Vestnik MGTU im. G.I. Nosov*. 2008. No. 2, pp. 66–69. (In Russian).
4. Izmailov V.V., Drozdova E.I., Chernogorova O.P., Potapova I.N., Novoselova M.V., Ekimov E.A. Electrical contact properties of a composite material with a copper matrix reinforced with superelastic solid carbon. *Metally*. 2015. No. 3, pp. 45–50. (In Russian).
5. Zeer G.M., Zelenkova E.G., Beletsky V.V., Nikolaev S.V., Kozhurin A.N., Kuchinsky M.Yu., Grigorieva O.A. Microstructure and properties of electrocontact material Cu- (ZnO / TiO<sub>2</sub>). *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki*. 2015. V. 85. No. 12, pp 88–93. (In Russian).
6. Eremina M.A., Lomaeva S.F., Pararin S.N., Demakov S.L., Elsukov E.P. Influence of the method of compacting on the structure and properties of bulk composites Cu + Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>. *Fizika metallov i metallovedeniye*. 2016. V. 117. No. 5, pp. 530–537. (In Russian).
7. Eremina M.A., Trifonov I.S., Lomaeva S.F., Tarasov V.V., Pararin S.N., Zayats S.V. Structure and wear resistance of Cu-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> nanocomposites. *Fizicheskaya mezomekhanika*. 2016. V. 19. No. 6, pp. 107–115. (In Russian).
8. Izmailov V.V., Novoselova M.V. Electrical contact properties of a composite diamond-containing copper material. *Vse materialy. Entsiklopedicheskiy spravochnik*. 2020. No. 5, pp. 25–29. (In Russian).

9. Izmailov V.V., Novoselova M.V. Electrical contact properties of a material containing refractory components. Composite copper – chromium carbide. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya «Tekhnicheskiye nauki»*. 2021. No. 2 (10), pp. 15–20. (In Russian).
10. Izmailov V.V., Novoselova M.V. Electrical contact properties of a material containing refractory components. Composite copper – tungsten carbide. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya «Tekhnicheskiye nauki»*. 2021. No. 3 (11), pp. 5–11. (In Russian).
11. Izmailov V.V., Novoselova M.V. Electrical contact properties of a material containing refractory components. Copper-based diamond-carbide composite. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya «Tekhnicheskiye nauki»*. 2021. No. 3 (11), pp. 12–19. (In Russian).
12. Izmailov V.V., Novoselova M.V. Electrical contact properties of a material containing refractory components. Multicomponent material. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya «Tekhnicheskiye nauki»*. 2021. No. 4 (12), pp. 5–13. (In Russian).
13. Ispolzovaniye funktsii zhelatelnosti Kharringtona pri reshenii optimizatsionnykh zadach khimicheskoy tekhnologii [Using the Harrington desirability function when solving optimization problems of chemical technology] / sost. S.L. Akhnazarova, L.S. Gordeev. Moscow: RKHTU im. D.I. Mendeleeva, 2003. 76 p.
14. Samokhvalov Yu.Ya., Burba O.I. Evaluation of the effectiveness of scientific and scientific-technical projects based on the generalized Harrington function. *Sistemy upravleniya, navigatsii i svyazi*. 2018. No. 4, pp. 77–85. (In Russian).
15. Opekunov A.Yu., Opekunova M.G. Integral assessment of landscape pollution using the Harrington desirability function. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Seriya 7. Geologiya. Geografiya*. 2014. No. 4, pp. 101–113. (In Russian).
16. Lyubushin N.P., Brikach G.E. The use of the generalized Harrington desirability function in multiparameter economic problems. *Ekonomicheskii analiz: teoriya i praktika*. 2014. No. 18 (370), pp. 2–10. (In Russian).
17. Pichkalev A.V. Harrington's generalized desirability function for comparative analysis of technical means. *Issledovaniya naukograda*. 2012. No. 1 (1), pp. 25–28. (In Russian).
18. Kharitonov E.A., Mikhailov O.V. Desirability function and the possibility of its application for the assessment of scientific activity in national research universities. *Vestnik Tekhnologicheskogo universiteta*. 2016. V. 19. No. 14, pp. 142–145. (In Russian).
19. Koroleva S.V. Practical aspects of using the desirability function in a biomedical experiment. *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya*. 2011. No. 6, pp. 71. URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=5270> (date accessed: 26.09.2021). (In Russian).
20. Myshkin N.K., Konchits V.V., Braunovich M. Elektricheskiye kontakty. [Electrical contacts]. Dolgoprudnyy: Intellekt, 2008. 560 p.
21. Spravochnik po raschetu i konstruirovaniyu kontaktnykh chastey sil'notochnykh elektricheskikh apparatov [Handbook for the calculation and design of contact parts of high-current electrical devices] / N.M. Adonyev, V.V. Afanasyev, V.V. Borisov [et al]. Leningrad: Energoatomizdat, 1988. 384 p.

Поступила в редакцию/received: 20.08.2021; после рецензирования/revised: 27.09.2021;  
принята/accepted: 01.10.2021

## ИННОВАЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ПОКРЫТИЯ С ЭФФЕКТОМ АДАПТАЦИИ ПРИ РЕЗАНИИ МЕТАЛЛОВ

А.М. МИГРАНОВ<sup>1</sup>, аспирант, М.Ш. МИГРАНОВ<sup>1</sup>, д-р техн. наук,  
Н.В. КОЛОСОВА<sup>2</sup>, аспирант, Э.З. АХМЕТОВА<sup>2</sup>, аспирант

<sup>1</sup>Уфимский государственный авиационный технический университет,  
450008, Уфа, ул. К. Маркса, д. 12, e-mail: migmars@mail.ru

<sup>2</sup>Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»,  
127055, Москва, Вадковский пер., д.3а

© Мигранов А.М., Мигранов М.Ш.,  
Колосова Н.В., Ахметова Э.З., 2021

Проведен анализ литературы по адаптивным материалам и износостойким покрытиям на режущем инструменте для лезвийной обработки резанием. Представлены результаты теоретико-экспериментальных исследований эксплуатационных свойств спеченных инструментальных материалов на основе быстрорежущей стали при дополнительном легировании присадками, обеспечивающими существенное повышение износостойкости режущего инструмента. Данное явление объяснено с позиции адаптации (самоорганизации) при трении путем формирования вторичных структур. При этом вторичные структуры играют двоякую роль: смазывающую и защитную (в виде аморфноподобных соединений).

*Ключевые слова:* адаптивные материалы, быстрорежущая сталь, самоорганизация, легирование, трение, термодинамика, вторичные структуры.

**DOI: 10.46573/2658-5030-2021-4-23-31**

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время существует довольно большое количество научных публикаций на тему адаптивных материалов и покрытий (АМиП). Термины «адаптивный» (от англ. to adapt – приспособливаться) и «интеллектуальный» стали широко использоваться в различных областях: материаловедении – адаптивные материалы и интеллектуальные композиты; трибологии – самоорганизующиеся покрытия, материалы со структурной приспособляемостью и т.п. Адаптивными (адаптирующимися, интеллектуальными, умными) называют материалы и покрытия, которые обладают способностью самопроизвольно приспособливаться (адаптироваться) к воздействиям внешней среды [1–3]. По существу, АМиП – это системы, способные «оценивать» внешние воздействия и реагировать на них. С этой точки зрения различают три основных вида АМиП: *пассивные* (в них вводят детекторы в виде волокон, пленок и других элементов), изменяющие свои характеристики при внешних воздействиях; *реактивные*, которые сами реагируют на внешние воздействия; *интеллектуальные*, которые не только реагируют на внешние воздействия, но и сами обеспечивают устранение их последствий, т.е. самовосстанавливаются [3, 4]. Материалы первой группы (пассивные) используют для диагностики конструкций из полимерных композитов, армированных волокнистыми наполнителями. Они работают на принципе самоконтроля состояния изделий с помощью встроенных в их структуру датчиков. Характерным признаком этих материалов является появление сигнала датчика о возникших в материале изменениях при внешних воздействиях. Наибольшее

развитие получили волоконно-оптические датчики, которые идеально подходят к структуре и технологии получения полимерных волокнистых композитов. Они представляют собой кремниевые волокна, заключенные в защитную оболочку. Эти волокна вводят в композит на стадии его формования, а затем уже в готовом изделии через волокна пропускают световой сигнал и регистрируют изменения его оптических характеристик (амплитуды, фазы и др.) под влиянием изменений, происходящих в окружающем оптическое волокно материале. Любые деформации и напряжения в композите вызывают соответствующие колебания характеристик светового сигнала. Таким образом, оптические волокна, введенные в полимерный композит, могут отслеживать при эксплуатации вибрации и деформации, разрушения и износ материала [5–7]. Материалы второй группы (реактивные) представляют собой АМиП, которые самопроизвольно реагируют на внешние механические, термические, физические и другие воздействия, изменяя собственную структуру и характеристики (геометрические, механические, физические и др.) или свойства сопряженных материалов. Реактивные материалы и конструкции имеют различные типы реагирования на изменения окружающей среды. К ним относятся самозатачивающиеся зубья, ножи и режущие кромки элементов рабочего оборудования. Они имеют двухслойную структуру из разнородных материалов, отличающихся различной износостойкостью. К более сложным системам второй группы относятся материалы, которые обладают «эффектом памяти» формы. Этот эффект заключается в восстановлении первоначальной формы пластически деформированного материала, которое происходит после его нагрева до определенной температуры [2]. К третьей группе «интеллектуальных» материалов относятся системы, которые обладают способностью не только производить самодиагностику, но и осуществлять самовосстановление. В частности, имеются сведения о разработке конструкционных материалов на основе полимерных композитов, которые, диагностируя наличие повреждений (например, микротрещин) одним из упомянутых ранее методов, реализуют механизм самовосстановления путем перераспределения материалов. Для залечивания микротрещин пытаются использовать комплексы наночастиц, которые должны обладать достаточной подвижностью, чтобы устранить дефекты структуры [3].

### **ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИКО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ПРЕДПОСЫЛКИ**

В настоящее время для полноценного осуществления лезвийной обработки резанием нужно активнее использовать последние достижения в области трибологии. Термодинамические подходы к анализу контактных явлений при трении и износе отражены в работах многих исследователей по трибологии [1–5]. Трибосистема рассматривается как открытая термодинамическая система и описывается первым и вторым принципами термодинамики. Процессы разрушения и отделения частиц износа возникают и развиваются в результате увеличения (активации) и уменьшения (пассивации) энергии поверхности. Высвобождение тепла обуславливает термическую активацию процессов при трении. Величина изменения энергии поверхности играет основную роль в контактных процессах в зоне резания, определяет механизм развития новых фаз и структур, контролирует величину и тип их деформации и последующее разрушение. Активация приводит поверхностные слои в неравновесное состояние. За активацией следует пассивация с последующим взаимодействием с окружающей средой и образованием защитных структур.

Согласно второму принципу термодинамики, в открытых системах при определенных соотношениях потоков энергии и вещества можно наблюдать процессы упорядочения. Данные процессы соответствуют уменьшению энтропии и появлению адаптирующихся рассеивающихся структур [2, 3]. В этом и заключается отличие

открытых систем от закрытых, где энтропия может только увеличиваться. Термин «структура» в данном случае рассматривается в термодинамическом смысле как вид связи между отдельными частями системы. Для явления адаптации характерен принцип экранирования, который состоит во взаимосвязи процессов разрушения и регенерации (восстановления) в зоне трения. Другими словами, существует динамическое равновесие между процессами активации и пассивации на поверхностных слоях. Когда равновесие нарушается, начинается разрушение материала поверхности. Таким образом, эффект экранирования при трении препятствует всем видам непосредственного взаимодействия поверхностей трибопары и разрушению основного металла. Контакт трибопары осуществляется с помощью вторичных структур, образующихся в зоне трения.

Рассеивание энергии во время трения связано с формированием устойчивых рассеивающих структур на контактной поверхности. Этот процесс можно рассматривать как пример использования адаптивных явлений в технике.

Адаптация во время трения сопровождается уменьшением эффективного объема материалов, в которых все виды взаимодействия имеют место, в том числе и локализация взаимодействий в тонких слоях на поверхности. Этот процесс происходит с максимальным расходом энергии, вплоть до разрушения. Одновременно самовосстанавливающиеся тонкие пленки появляются на трущихся поверхностях, их свойства существенно отличаются [5, 6].

В целом на основе вышеизложенного можно выдвинуть ряд требований для повышения износостойкости режущего инструмента:

необходимо ориентироваться на создание таких условий, в которых трибосистема при заданных режимах трения не выводится в область высокой неустойчивости, сопровождаемой глубинным разрушением материалов;

следует обеспечить переход из неравновесного термодинамически нелинейного состояния в равновесное стационарное с ускоренным образованием благоприятной поверхностной структуры, формирующейся в результате самоорганизации, и с оказанием необходимой «помощи» (за счет использования смазочно-охлаждающих технологических средств (СОТС); покрытий, позволяющих создавать благоприятное воздействие (смазывающее и охлаждающее действия путем применения поверхностно-активных веществ, изменения кинематической вязкости или интенсификаторов охлаждения, рекуперации или перераспределения теплового потока и т.д.));

нужно обеспечить протекание адаптации системы с переходом в устойчивое состояние при минимальных потерях на трение, наименьшей величине износа и других трибологических характеристиках. Решающую роль здесь играет структурная адаптация. Иногда трибосистема работает в жестких условиях, когда адаптация не успевает пройти. Нестабильная работа трибосистемы приводит к повышенному износу, тепловыделению, потерям на трение и др. В ряде случаев такая работа является естественной, и система работает в режимах высокой неравновесности в неустойчивом состоянии;

стоит предусматривать желательное направление пластической деформации, локализованное в тонком поверхностном слое (геометрическая адаптация, переменность элементов режима резания);

необходимо осуществлять оптимизацию материалов износостойких покрытий для режущего инструмента с учетом обрабатываемого материала и конкретных условий резания;

следует учитывать закономерности упругопластической деформации и температурных условий при различных режимах резания как в период приработки, так и в послеприработочный период.

Используя изложенные выше представления о механизме износа инструмента, можно сформулировать требования к поверхности инструмента, контактирующей с обрабатываемым материалом:

1) с позиции сопротивления адгезионно-усталостному износу в поверхности необходимы соединения, имеющие минимальную адгезию к обрабатываемому материалу и максимальную – к инструментальному материалу. С позиции усталостной прочности следует стремиться к созданию в поверхностном слое остаточных напряжений сжатия;

2) с позиции сопротивления абразивному износу следует иметь поверхность инструмента как можно более высокой твердости. Твердость поверхности не должна существенно уменьшаться при повышении температуры;

3) с позиции сопротивления окислительному износу соединения, входящие в состав инструментального материала (подложки), должны обладать большой термодинамической стабильностью при формировании устойчивых структур с большей износостойкостью. Иногда, наоборот, желательно, чтобы поверхностный слой (СОТС, покрытие) был активен к окислителю (кислороду или активной среде) и способствовал формированию защитных и экранирующих вторичных структур;

4) стойкость инструмента к диффузионному износу определяется прочностью химических связей составляющих его компонентов, так как диффузионному обмену будет предшествовать диссоциация этих компонентов (карбидов) на составляющие элементы (Ti, Ta, W, C). Как и в случае окислительного износа, желательна изоляция связки (Co) от контакта с обрабатываемым материалом.

## **МАТЕРИАЛЫ И ОБОРУДОВАНИЕ.**

### **РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

В качестве примера адаптации представим некоторые методы воздействия на условия трения при резании металлов путем легирования спеченных порошковых инструментальных материалов (СПИМ) нового поколения на основе быстрорежущей стали. Порошковые инструментальные материалы на основе быстрорежущей стали, легированные карбидом титана (карбидосталь), обладают высокой износостойкостью, поэтому их можно считать новым классом адаптивных инструментальных материалов. В частности, к таковым относятся СПИМ, содержащие в качестве твердой основы карбид титана, а быстрорежущую сталь (Р6М5) – как связующее (например, СПИМ + 20 % TiC или СПИМ + 20 % TiC + 5 % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Адаптация таких материалов проявляется в их способности образовывать устойчивые высокопрочные фазы (оксиды и нитриды), которые эффективно защищают поверхность от внешних воздействий при резании. При помощи электронной оже-спектроскопии и спектроскопии вторичной ионной массы было обнаружено, что в процессе резания карбиды титана превращаются в тонкие поверхностные пленки в виде соединения титана с кислородом. Это значительно улучшает фрикционные свойства при рабочих температурах резания и повышает износостойкость режущего инструмента (рис. 1). Как показали исследования, износостойкость такого инструмента в 2–3,5 раза выше износостойкости обычных инструментов из быстрорежущей стали.

Наиболее общеизвестным приемом совершенствования эксплуатационных характеристик режущих инструментов является нанесение на их рабочие поверхности функциональных адаптивных износостойких покрытий. При этом каждый слой такого покрытия должен формироваться с учетом изменения механизма изнашивания в периоды приработочного, нормального (устойчивого) и катастрофического износа. Для обеспечения данного условия, выбирая металлические материалы, мы принимали во внимание известные исследования по трибологической совместимости

контактирующих элементов [6–10]. Для имплантации были выбраны химические элементы с наименьшей совместимостью в трибопарах с железом, никелем и титаном (рис. 2), т.е. с металлами, входящими в состав обрабатываемых материалов: низколегированных, теплостойких и коррозионностойких сталей, а также титановых и никелевых сплавов, широко используемых в деталях машин. Более того, азотированная поверхность инструмента подвергалась ионному смешиванию с четырьмя типами антифрикционных сплавов, часто используемых для улучшения условий трения скольжения: сплавом на основе цинка Zn + Al(9 %) + Cu(2 %); на основе меди Cu + Pb(12 %) + Sn(8 %); на основе свинца Pb + Sn(1 %) + Cu(3 %); на основе алюминия Al + Sn(20 %) + Cu(1 %) + Si(0,5 %).

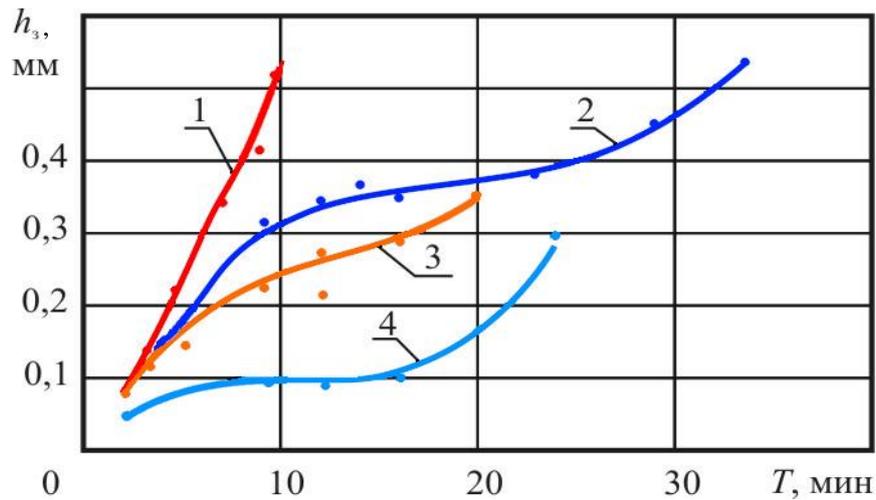


Рис. 1. Влияние времени обработки на износ режущего инструмента по задней поверхности: 1 – СПИМ + 20 % TiC; 2 – СПИМ + 20 % TiC + 2 % BN; 3 – СПИМ + 15 % TiC + 5 % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 4 – СПИМ + 20 % TiCN (точение стали 45; V = 70 м/мин; t = 0,5 мм; S = 0,28 мм/об)

В работе для покрытий, которые ранее формировались на двух стадиях (диффузионного насыщения азотом – азотирования – и нанесения покрытия (TiCr)N), предлагается создать дополнительный (промежуточный, легированный) слой, имплантированный на ранее азотированную поверхность быстрорежущей стали. Как показали исследования, такое многослойное покрытие значительно увеличивает (в 2,1–2,4 раза) износостойкость режущего инструмента за счет расширения стадии нормального износа. Было исследовано влияние 16 химических элементов и 4 антифрикционных материалов, имплантированных в базовую поверхность, на износостойкость резца из быстрорежущей стали с техническим (TiCr)N покрытием на инструменте. Установлено, что лучшие позиции по износостойкости занимают покрытия с нижним слоем, модифицированным элементами, обеспечивающими высокие антифрикционные свойства. Кроме того, были рассмотрены некоторые способы улучшения «дуплексных» покрытий путем формирования слоя после дополнительной модификации подложки, причем ионное смешивание осуществлялось на предварительно насыщенной ионами азота поверхности из быстрорежущей стали. Такие многослойные покрытия позволяют увеличить период стойкости инструмента в 3–4 раза.

Было исследовано влияние на период стойкости инструмента пяти пар элементов, которые добавили в виде ионной смеси в основную поверхность подложки из быстрорежущей стали. Как видно из таблицы, наилучшая износостойкость была получена для «триплексного» покрытия с подложкой, содержащей ионную смесь (Ti + N).

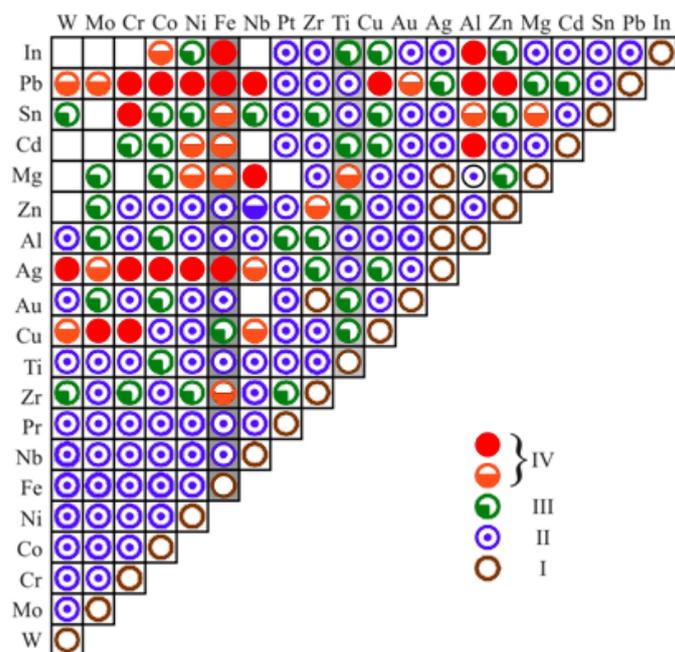


Рис. 2. Взаимная растворимость металлов с образованием бинарной фазы:  
IV – низкая; III – ограниченная; II – устойчивая; I – высокая

Относительный период стойкости режущего инструмента  
с триплексным покрытием

Элементы смешивания	Относительный период стойкости	
	Без охлаждения	С охлаждением
Al + O	3,0	–
Ti + N	4,0	2,5
Zr + N	0,53	–
W + N	0,4	–
W + C	1,33	–

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработка и конструирование адаптивных функциональных покрытий на основе выбора составляющих каждого отдельного слоя в соответствии с функциональным назначением (при оптимизации их последовательности и толщин) позволяют прогнозировать свойства и эксплуатационные характеристики деталей машин и металлорежущего инструмента.

По результатам экспериментальных исследований адаптивных (самоорганизующихся) материалов и покрытий можно сказать, что было сделано следующее:

показано, что спеченные порошковые материалы на основе быстрорежущей стали, дополнительно легированные карбидом титана (карбидосталь), имеют такую особенность, как высокая износостойкость, и могут считаться новым классом адаптивных инструментальных материалов. К таковым стоит, в частности, отнести совместно спеченные и прессованные порошки карбида титана в качестве основы и быстрорежущей стали в качестве связующего вещества. Адаптация этих материалов проявляется в их способности образовывать устойчивые высокопрочные вторичные структуры, которые эффективно защищают поверхность инструмента от внешних воздействий при резании. В процессе резания наблюдается преобразование карбидной фазы в устойчивые вторичные структуры, имеющие форму соединений из титана и кислорода. Это значительно улучшает фрикционные свойства при рабочих температурах и, как следствие, повышает износостойкость режущего инструмента. В результате износостойкость такого инструмента в 2,0–3,5 раза выше, чем износостойкость инструмента из быстрорежущих сталей;

предложена новая физическая концепция явления адаптации в мультифазовых материалах. Рассмотрены некоторые подходы к воздействию на трение и износ для порошковых инструментальных материалов нового поколения (СПИМ на основе быстрорежущей стали). Первый способ может осуществляться добавлением 5 %  $Al_2O_3$ , что снижает коэффициент трения при рабочих температурах. Второй способ – это расширение интервала самоорганизации с помощью устойчивых высокопрочных вторичных структур, развивающихся на поверхности инструмента. Он осуществляется добавлением 2 % VN. Оба подхода можно реализовывать с помощью присадки 20 % TiCN;

установлено повышение износостойкости поверхности в результате двухступенчатого упрочнения поверхностного слоя инструмента: 1) путем диффузионного насыщения азотом (ионного азотирования быстрорежущей стали); 2) нанесения износостойкого покрытия со сложнелегированными нитридами (Ti,Cr)N. Предлагаемый вариант покрытия включает в себя также дополнительный модифицированный нижний слой, полученный ионной имплантацией поверхности быстрорежущей стали, предварительно подвергшейся азотированию в тлеющем разряде ионов азота. Такое многослойное покрытие позволяет значительно повысить (в 2,1–2,4 раза) износостойкость инструмента благодаря продлению стадии нормального износа.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Иванова В.С. Синергетика: прочность и разрушение металлических материалов. М.: Наука, 1992. 158 с.
2. Исаев С.И. Термодинамика. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. 412 с.
3. Кабалдин Ю.Г. Самоорганизация в процессах трения и смазки при резании // *Вестник машиностроения*. 2003. № 10. С. 53–59.
4. Пригожин И., Кондипуди Д. Современная термодинамика. От тепловых двигателей до диссипативных структур. М.: Мир, 2002. 461 с.

5. Fox-Rabinovich G., Gershman I.S., Yamamoto K., Dosbaeva J., Veldhuis S. Effect of the Adaptive Response on the Wear Behavior of PVD and CVD Coated Cutting Tools during Machining with Built Up Edge Formation // *Nanomaterials*. 2020. V. 10. №. 12. P. 2489.
6. Gershman I., Gershman E.I., Mironov A.E., Fox-Rabinovich G.S., Veldhuis S.C. Application of the self-organization phenomenon in the development of wear resistant materials – A Review // *Entropy*. 2016. V. 18. No. 11. P. 385.
7. Бокштейн Б.С., Ярославцев А.Б. Диффузия атомов и ионов в твердых телах. М.: МИСиС, 2005. 362 с.
8. Migranov M.S., Migranov A.M., Minigaleev S.M., Shehtman S.R. Tribological properties of multilayer coatings for cutting tool // *Journal of Friction and Wear*. 2018. V. 39. No. 3. P. 245–250.
9. Migranov M.S., Shekhtman S.R., Migranov A.M. Improve wear resistance of composite coatings on cutting tool from high-speed steel // *Journal of Physics: Conference Series*. – IOP Publishing. 2019. V. 1281. No. 1. P. 012053.
10. Krioni N.K., Migranov M.S., Fox-Rabinovich G.S., Shuster L.S. Study of the tribotechnical properties of a cutting tool made of sintered powder tool materials // *Journal of Friction and Wear*. 2018. V. 39. No. 1. P. 12–18.

**Для цитирования:** Мигранов А.М., Мигранов М.Ш., Колосова Н.В., Ахметова Э.З. Инновационные материалы и покрытия с эффектом адаптации при резании металлов // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2021. № 4 (12). С. 23–31.

## **INNOVATIVE MATERIALS AND COATINGS WITH THE EFFECT OF ADAPTATION WHEN CUTTING METALS**

A.M. MIGRANOV<sup>1</sup>, Postgraduate, M.Sh. MIGRANOV<sup>1</sup>, Dr. Sc.,  
N.V. KOLOSOVA<sup>2</sup>, Postgraduate, E.Z. AKHMETOVA<sup>2</sup>, Postgraduate

<sup>1</sup>Ufa State Aviation Technical University, 12, K. Marx st.,  
450008, Ufa, Russian Federation, e-mail: migmars@mail.ru

<sup>2</sup>Moscow State University of Technology «STANKIN»,  
3a, Vadkovsky lane, 127055, Moscow, Russian Federation

The literature on adaptive materials and wear-resistant coatings on cutting tools for blade cutting is analyzed. The results of theoretical and experimental studies of the operational properties of sintered tool materials based on high-speed steel with additional alloying with additives, which provide a significant increase in the wear resistance of the cutting tool, are presented and this phenomenon is explained from the point of view of adaptation (self-organization) during friction by forming secondary structures. In this case, the secondary structures play a dual role: lubricating and protective in the form of amorphous compounds.

*Keywords:* adaptive materials, high-speed steel, self-organization, alloying, friction, thermodynamics, secondary structures.

## REFERENCES

1. Ivanova V.S. Sinergetika: Prochnost i razrusheniye metallicheskikh materialov [Synergetics: Strength and degradation of metallic materials]. Moscow: Nauka, 1992. 158 p.
2. Isaev S.I. Termodinamika [Thermodynamics]. Moscow: MGTU im. N.E. Baumana, 2000. 412 p.
3. Kabaldin Yu.G. Self-organization in the processes of friction and lubrication during cutting. *Vestnik mashinostroyeniya*. 2003. No. 10, pp. 53–59. (In Russian).
4. Prigozhin I., Kondipudi D. Sovremennaya termodinamika. Ot teplovykh dvigateley do dissipativnykh struktur [Modern thermodynamics. From heat engines to dissipative structures]. Moscow: Mir, 2002. 461 p.
5. Fox-Rabinovich G., Gershman I.S., Yamamoto K., Dosbaeva J., Veldhuis S. Effect of the Adaptive Response on the Wear Behavior of PVD and CVD Coated Cutting Tools during Machining with Built Up Edge Formation. *Nanomaterials*. 2020. V. 10. No. 12, pp. 2489.
6. Gershman I., Gershman E.I., Mironov A.E., Fox-Rabinovich G.S., Veldhuis S.C. Application of the self-organization phenomenon in the development of wear resistant materials – A Review. *Entropy*. 2016. V. 18. No. 11, pp. 385.
7. Bokshcheyn B.S., Yaroslavtsev A.B. Diffuziya atomov i ionov v tverdykh telakh [Diffusion of atoms and ions in solids]: Moscow: MISIS, 2005. 362 p.
8. Migranov M.S., Migranov A.M., Minigaleev S.M., Shehtman S.R. Tribological properties of multilayer coatings for cutting tool. *Journal of Friction and Wear*. 2018. V. 39. No 3, pp. 245–250.
9. Migranov M.S., Shekhtman S.R., Migranov A.M. Improve wear resistance of composite coatings on cutting tool from high-speed steel. *Journal of Physics: Conference Series*. – IOP Publishing. 2019. V. 1281. No. 1, pp. 012053.
10. Krioni N.K., Migranov M.S., Fox-Rabinovich G.S., Shuster L.S. Study of the tribotechnical properties of a cutting tool made of sintered powder tool materials. *Journal of Friction and Wear*. 2018. V. 39. No. 1, pp. 12–18.

Поступила в редакцию/received: 31.05.2021; после рецензирования/revised: 30.07.2021;  
принята/accepted: 30.08.2021

## ВЛИЯНИЕ ВНЕШНЕГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА ГЛУБИНУ ПРОПЛАВЛЕНИЯ ПРИ ЛАЗЕРНОЙ СВАРКЕ СТАЛЕЙ

Л.Е. АФАНАСЬЕВА, канд. физ.-мат. наук, И.Ю. КОБОЗЕВ, магистрант

Тверской государственной технической университет, 170026, Тверь,  
наб. Аф. Никитина, д. 22, e-mail: ludmila.a@mail.ru

© Афанасьева Л.Е., Кобозев И.Ю., 2021

Рассматриваются возможности бесконтактного воздействия на процесс лазерной сварки с помощью внешнего электрического поля. Приведена схема установки. Представлены экспериментальные данные о влиянии внешнего электрического поля на глубину проплавления при лазерной сварке заготовок конструкционных сталей.

*Ключевые слова:* лазерная сварка, лавинная ионизация, плазменный факел, глубина проплавления, электрическое поле.

**DOI: 10.46573/2658-5030-2021-4-32-37**

### ВВЕДЕНИЕ

При лазерной сварке металлических материалов в атмосфере защитных газов He, Ar, CO<sub>2</sub> образуется плазма, оказывающая на лазерное излучение экранирующее, поглощающее и расфокусирующее действие [1–4]. В результате снижается экономическая эффективность технологии лазерной сварки, изменяется форма шва и глубина проплавления. С увеличением мощности лазерного излучения процесс плазмообразования усиливается, наблюдается тенденция к заметному уменьшению глубины проплавления металла. При сварке заготовок толщиной более 10 мм повышение интенсивности лазерного излучения нередко приводит к пробоем плазмы, кипению и выплеску металла из сварочной ванны [1–3].

Чтобы уменьшить негативное влияние плазмы, часто используют ее непрерывный сдув струей гелия или других инертных газов. Однако из-за повышенного расхода и высокой стоимости инертных газов производство сварных конструкций лазерной сваркой становится дорогостоящим.

Значительная роль в формировании плазменного факела принадлежит процессам лавинной ионизации, в связи с чем стали возникать предложения по управлению этими процессами с помощью внешних электрических и магнитных полей, способных воздействовать на движение свободных электронов и положительных ионов в прилегающих к обрабатываемой поверхности объемах газа.

В ряде статей рассматриваются возможности использования внешних электрических и магнитных полей в качестве альтернативного метода контроля плазмы [3–9]. Результаты экспериментов показали, что магнитное поле может заметно влиять на экранирующий эффект плазмы без газа, сдувающего плазму. В работе [3] было установлено, что при низкой напряженности внешнего магнитного поля глубина проплавления увеличивалась примерно на 7 %, и не было выявлено значительной разницы в ширине сварных швов. Кроме того, было показано, что эффективность использования энергии при обработке мощным лазерным излучением в значительной степени определяется плазменными явлениями [3].

В работе [4] авторы создали трехмерную численную модель и провели экспериментальные исследования влияния продольного магнитного поля на ванну расплава при лазерной сварке сплава Mg-Al. Были исследованы морфология и распределение элементов в поперечном сечении ванны расплава. Результаты моделирования показали, что под влиянием внешнего магнитного поля градиент температуры ванны расплава уменьшается, т.е. распределение тепла становится более равномерным, а площадь сечения сварного шва увеличивается. Кроме того, наблюдается увеличение скорости течения ванны расплава. Экспериментально установили, что под действием продольного магнитного поля глубина проплавления при сварке возрастает, формируются сварные швы симметричной формы, а конвекция жидкого металла в ванне расплава ускорена.

Цель настоящей работы – провести экспериментальные исследования влияния внешнего электрического поля на процессы лазерной сварки конструкционных сталей.

### **МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ**

Исследования проводили на базе лаборатории лазерной сварки Института проблем лазерных и информационных технологий РАН (г. Шатура Московской области). Использовали технологическую лазерную установку модели ТЛ-5М производства ЗАО «Лазерные комплексы». Длина волны лазерного излучения – 10,6 мкм, форма излучения – кольцо, апертура излучения – 50 мм, линза – КС1 (фокусное расстояние – 200 мм).

Сварку производили на листе углеродистой стали марки 15 (ГОСТ 1050-2013) толщиной 1,0 мм и нержавеющей стали марки 12Х18Н10Т (ГОСТ 5632-2014) толщиной 1,2 мм. Режимы сварки: мощность излучения – 1 кВт; скорость сварки – 1,5 м/мин; расход защитного газа аргона – 5 л/мин. Постоянный ток подавался от источника питания Б5-47 напряжением 30 В.

Контроль глубины проплавления осуществлялся путем наблюдения микроструктуры на поперечных сечениях сварных швов. Металлографические исследования выполняли с помощью оптического микроскопа МИМ-8 с цифровой камерой.

### **РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ**

Эффективному использованию лазеров большой мощности в сварке препятствует образование плазмы. Плазма существует как внутри каверны, так и над поверхностью свариваемого металла. Установлено [1], что приповерхностная плазма (эрозионный факел) не обладает стабильностью в течение процесса сварки и изменяет свое положение относительно места входа луча в сварочную каверну. При этом она не экранирует лазерное излучение. Определяющее воздействие на лазерное излучение при сварке металла больших толщин оказывает плазма каверны, особенно та ее часть, которая возвышается над поверхностью свариваемого металла.

Температура плазмы может быть от 4 000 до 22 000 °С и зависит от интенсивности подведенной энергии [1, 6]. При высоких температурах частицы, образующие плазму (электроны, ионы), находятся в хаотическом тепловом движении с высокими скоростями. Согласно оценкам, выполненным в работе [10], скорость электронов значительно (более чем в 50 раз) превышает скорость ионов, в результате чего эти два типа частиц разделяются. Электроны концентрируются в основном в области сопла, а ионы – вблизи поверхности обрабатываемого металла.

При выполнении сварки по телу в настоящей работе измеряли силу тока плазмы между стальным листом и соплом. Возникновение плазменного тока в электрической

цепи обусловлено разницей в скоростях движения электронов и ионов. Схема установки представлена на рис. 1. Величина плазменного тока – около 0,8–1 мА для стали 15 и около 0,5 мА для нержавеющей стали.

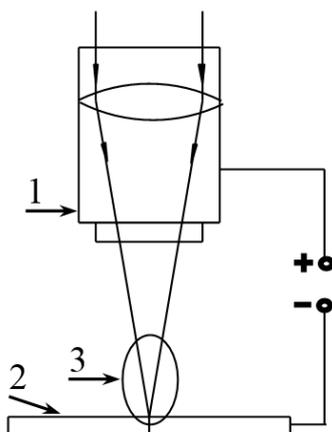


Рис. 1. Схема установки: 1 – сопло;  
2 – стальная заготовка; 3 – плазменный факел

На рис. 2 и 3 показаны микроструктуры поперечных сечений сварных швов на углеродистой и нержавеющей стали, полученных при наложении электрического поля на область сварки и без поля. Параметры сварки устанавливались таким образом, чтобы глубина проплавления была несколько меньше толщины листа. Анализ изображений микроструктуры сварных соединений показал, что для обоих материалов воздействие электрическим полем приводит (при прочих равных условиях) к увеличению глубины проплавления.

Характер формирования шва зависит в основном от двух факторов: подвода теплоты и условий теплоотвода [1, 2]. При сварке нержавеющей стали в верхней части формируется шов чашеобразной формы, в центральной и корневой части проплавление носит кинжальный характер. Обычно при лазерной сварке наблюдается неравномерное распределение теплоты по сечению шва. Это выражается в градиенте температур по высоте и поперечному сечению сварочной ванны, а также различном времени пребывания расплава  $t$  при температуре выше температуры плавления. Наиболее высокая температура нагрева наблюдается в чашеобразной верхней части шва. Неравномерность температуры нагрева и времени  $t$  приводит к уширению верхней части шва и формированию кинжальной формы проплавления в центральной части.

Условия теплоотвода в центральной зоне шва отличаются от условий теплоотвода в чашеобразной части. В центральной и нижней частях сварного шва теплопередача осуществляется в основной металл. В верхней чашеобразной зоне теплоотвод происходит посредством теплопередачи в основной металл и конвективных потоков при взаимодействии с газовой защитой шва. Теплоотвод конвективными потоками осуществляется менее интенсивно в сравнении с теплопередачей в тело металла. Таким образом, кристаллизация в процессе сварки происходит поступательно по высоте шва.

При сварке нержавеющей стали марки 12Х18Н10Т наложение внешнего электрического поля привело к увеличению глубины проплавления на 8 % в сравнении со сварными швами, полученными без поля (рис. 2). При сварке углеродистой стали 15 наложение внешнего электрического поля привело к увеличению глубины

проплавления до 15 % (рис. 3). Форма поперечного сечения сварной зоны при данных параметрах сварки существенных изменений не претерпела.

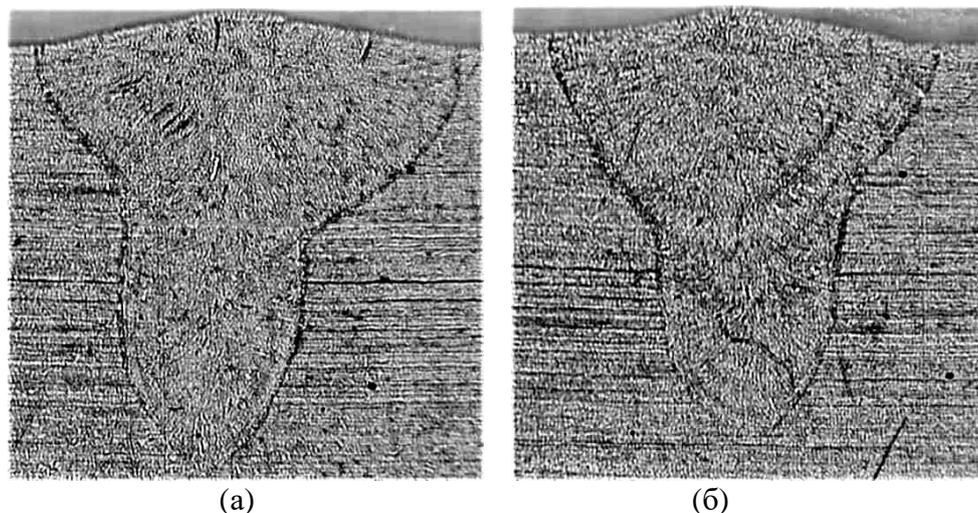


Рис. 2. Макрошлифы сварных швов на нержавеющей стали марки 12X18H10T: с наложением постоянного тока напряжением 30 В (а); без тока (б). Увеличение – х40

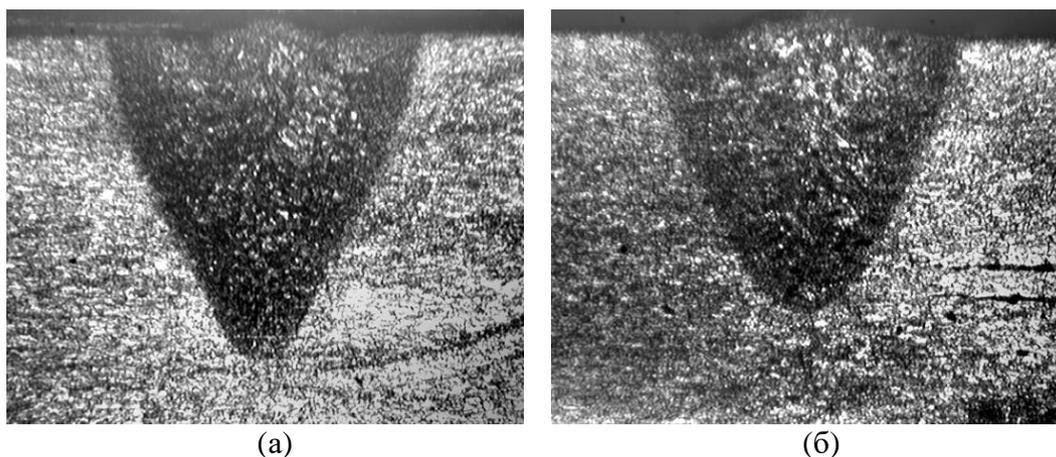


Рис. 3. Макрошлифы сварных швов на углеродистой стали 15: с наложением постоянного тока напряжением 30 В (а); без тока (б). Увеличение – х40

Результаты проведенной работы показывают положительное влияние внешнего электрического поля на глубину проплавления при лазерной сварке и необходимость систематического изучения его влияния в широком диапазоне значений.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Эффективность использования энергии при лазерной сварке можно значительно повысить, применяя внешнее электрическое поле для управления процессом плазмообразования. После выполнения работы было получено заметное увеличение глубины проплавления (8–15 %) при лазерной сварке конструкционных сталей под влиянием внешнего электрического поля. Результаты исследований рекомендуется использовать при лазерной сварке материалов больших толщин.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Грезев А.Н. Плазмообразование при лазерной сварке с глубоким проплавлением // *Сварочное производство*. 2005. № 5. С. 20–25.
2. Грезев А.Н. Формирование парогазового канала сварочной ванны при лазерной сварке // *Сварочное производство*. 2005. № 6. С. 13–17.
3. Tse H.C., Man H.C., Yue T.M. Effect of magnetic field on plasma control during CO<sub>2</sub> laser welding // *Optics & Laser Technology*. 1999. V. 31. № 5. P. 363–368.
4. Zhou J., Zhou D., Liu J. Numerical and experimental investigation of magnesium/aluminum laser welding with magnetic field // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2021. P. 1–15.
5. Zhang X., Zhao Z., Wang C., Yan F., Hu X. The effect of external longitudinal magnetic field on laser-MIG hybrid welding // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2016. V. 85. № 5. P. 1735–1743.
6. Chen G., Zhang M., Zhao Z., Zhang Y., Li S. Measurements of laser-induced plasma temperature field in deep penetration laser welding // *Optics & Laser Technology*. 2013. V. 45. P. 551–557.
7. Jiang M., Tao W., Wang S., Li L., Chen Y. Effect of ambient pressure on interaction between laser radiation and plasma plume in fiber laser welding // *Vacuum*. 2017. V. 138. P. 70–79.
8. Afanas'eva L.E., Barabonova I.A., Zorenko P.O., Yakovlev I.A., Grechishkin R.M., Grezev A.N., Grezev N.V. Laser welding in external electrical and magnetic fields // *Welding International*. 2013. V. 27. № 7. P. 545–547.
9. Афанасьева Л.Е., Зигерт А.Д., Иванова А.И., Гречишкин Р.М. Магнитооптическая визуализация дефектов сварных соединений // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2020. № 1 (5). С. 13–20.
10. Peng Y., Chen W., Wang C., Bao G., Tian Z. Controlling the plasma of deep penetration laser welding to increase power efficiency // *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2001. V. 34. № 21. P. 3145–3149.

**Для цитирования:** Афанасьева Л.Е., Кобозев И.Ю. Влияние внешнего электрического поля на глубину проплавления при лазерной сварке сталей // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2021. № 4 (12). С. 32–37.

## INFLUENCE OF EXTERNAL ELECTRIC FIELD ON THE DEPTH OF PENETRATION IN LASER WELDING OF STEELS

L.E. AFANASIEVA, Cand. Sc., I.Yu. KOBOZEV, undergraduate

Tver State Technical University, 22, Af. Nikitin emb., 170026, Tver,  
Russian Federation, e-mail: ludmila.a@mail.ru

Possibilities of non-contact control of laser welding with the aid of external electric field are considered. Schemes of coupling the field sources with laser technological installations are given. Experimental results on the effect of external electric field on laser welding of structural steel blanks are presented.

*Keywords:* laser processing, avalanche ionization, plasma torch, welding depth, electric field.

## REFERENCES

1. Gresev A.N. Plasma formation in laser welding with deep penetration. *Svarochnoye proizvodstvo*. 2005. No. 5, pp. 20–25. (In Russian).
2. Gresev A.N. Formation of a vapor-gas channel of the weld pool during laser welding. *Svarochnoye proizvodstvo*. 2005. No. 6, pp. 13–17. (In Russian).
3. Tse H.C., Man H.C., Yue T.M. Effect of magnetic field on plasma control during CO<sub>2</sub> laser welding. *Optics & Laser Technology*. 1999. V. 31. No. 5, pp. 363–368.
4. Zhou J., Zhou D., Liu J. Numerical and experimental investigation of magnesium/aluminum laser welding with magnetic field. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2021, pp. 1–15.
5. Zhang X., Zhao Z., Wang C., Yan F., Hu X. The effect of external longitudinal magnetic field on laser-MIG hybrid welding. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2016. V. 85. No. 5, pp. 1735–1743.
6. Chen G., Zhang M., Zhao Z., Zhang Y., Li S. Measurements of laser-induced plasma temperature field in deep penetration laser welding. *Optics & Laser Technology*. 2013. V. 45, No. 5, pp. 551–557.
7. Jiang M., Tao W., Wang S., Li L., Chen Y. Effect of ambient pressure on interaction between laser radiation and plasma plume in fiber laser welding. *Vacuum*. 2017. V. 138, pp. 70–79.
8. Afanas'eva L.E., Barabonova I.A., Zorenko P.O., Yakovlev I.A., Grechishkin R.M., Grezev A.N., Grezev N.V. Laser welding in external electrical and magnetic fields. *Welding International*. 2013. V. 27. No. 7, pp. 545–547.
9. Afanasieva L.E., Zigert A.D., Ivanova A.I., Grechishkin R.M. Magneto-optical visualization of welded joints defects. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya «Tekhnicheskiye nauki»*. 2020. No. 1 (5), pp. 13–20. (In Russian).
10. Peng Y., Chen W., Wang C., Bao G., Tian Z. Controlling the plasma of deep penetration laser welding to increase power efficiency. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2001. V. 34. No. 21, pp. 3145–3149.

Поступила в редакцию/received: 21.09.2021;  
после рецензирования/reviced: 05.10.2021; принята/accepted: 11.10.2021

# ТРАНСПОРТНОЕ, ГОРНОЕ И СТРОИТЕЛЬНОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 622.331.002.5

## ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ УСТАНОВКИ СОПЛА ТОРФЯНОЙ ПНЕВМОУБОРОЧНОЙ МАШИНЫ НАД ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ ЗАЛЕЖИ

А.Л. ЯБЛОНЕВ, д-р техн. наук, Д.М. ЩЕРБАКОВА, аспирант

Тверской государственной технической университет,  
170026, Тверь, наб. Аф. Никитина, д. 22, e-mail: alvovich@mail.ru

© Яблонев А.Л., Щербакова Д.М., 2021

Перечислены параметры, влияющие на эффективность всасывания торфяной крошки пневмоуборочными машинами. Среди них – высота расположения сопла над подстилающей поверхностью залежи и угол установки сопла. Поскольку сведений и рекомендаций о рациональных значениях этих параметров крайне мало, с помощью специально созданной установки был проведен лабораторный эксперимент по оценке скорости воздушного потока в зависимости от удаления от сопла, угла установки сопла и высоты расположения сопла над подстилающей поверхностью залежи. Представлены результаты эксперимента. Показано, что воспроизвести нулевое расстояние от сопла до подстилающей поверхности на практике невозможно, поэтому рекомендовано ограничиться высотой 25 мм, равной максимальному размеру кондиционной торфяной крошки. Отмечено, что для более точных результатов необходимо провести еще одну серию экспериментальных работ по оценке параметров всасывания соплом торфяной крошки с конкретными физико-механическими характеристиками.

*Ключевые слова:* торфяная пневмоуборочная машина, всасывающее сопло, скорость воздушного потока, анемометр, торфяная крошка, высота расположения сопла над подстилающей поверхностью залежи.

**DOI: 10.46573/2658-5030-2021-4-38-46**

### ВВЕДЕНИЕ

Добыча торфа пневмоуборочным комплексом машин имеет ряд неоспоримых преимуществ перед механической уборкой. Основные из них – сокращение продолжительности цикла и номенклатуры оборудования, возможность сохранения естественной волокнистой структуры торфа, необходимой для производства удобрений [1, 2]. Интенсификация добычи фрезерного торфа пневмомашинami во многом зависит от их надежности, правильного выбора параметров настройки и установки всасывающего сопла [3]. Угол установки сопла в сочетании с высотой его расположения над подстилающей поверхностью определяет длину и интенсивность всасывающего факела. Очевидно, что для уменьшения потерь энергии воздушной струи и торфа при уборке высота установки сопла над подстилающей поверхностью должна быть минимально возможной и находиться в пределах 0–25 мм, т.е. не должна превышать размер самой крупной фракции добываемого кондиционного торфа. Вместе с тем сопло ни в коем случае не должно оказывать вертикального давления на расстил,

*Вестник Тверского государственного технического университета.  
Серия «Технические науки». № 4 (12), 2021*

так как в противном случае возникают эффекты придавливания и перемешивания расстила [4]. Каких-либо точных данных и рекомендаций по выбору угла установки сопла на сегодняшний день нет, за исключением положения о том, что он не может превышать угла внутреннего трения добываемой породы [5], поскольку попавший в сопло под действием струи воздуха фрезерный торф не должен самопроизвольно скатываться вниз [6, 7]. Для фрезерного торфа угол естественного откоса (трения в покое) составляет  $32\text{--}45^\circ$  [8]. Поскольку угол внутреннего трения сыпучего материала в движении составляет, как правило, 70 % от угла естественного откоса в покое, то рекомендуемый угол установки сопла должен быть  $22,4\text{--}31,5^\circ$ . Канадские торфоуборочные машины SA-200, производимые компанией «Premier Tech», выпускаются с вертикально установленными соплами (угол установки сопла близок к  $90^\circ$ ). Однако опыт эксплуатации таких машин показал, что вертикальные сопла плохо вписываются в рельеф поверхности торфяных полей и образуют большие потери торфа при сборе [9]. Разброс параметров установки сопла, как видно, весьма большой, поэтому было принято решение о проведении серии лабораторных экспериментальных работ, целью которых является определение скорости воздушного потока, всасываемого соплом, в зависимости от параметров установки сопла относительно подстилающей поверхности залежи.

### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Разработанная и созданная экспериментальная лабораторная установка для определения скоростей и параметров всасывания и витания торфяной крошки состоит из источника постоянного тока 1, электродвигателя постоянного тока 2, вентилятора 3, спрямляющей решетки 4, витательной трубы 5, рамы витательной трубы 6, пульта управления 7, микроманометра 8, гофрированной алюминиевой трубы 9, штатива 10, экспериментального сопла 11, конвейерной ленты из двухслойного прорезиненного брезента 12, стоек 13 и рамы установки 14 (рис. 1).

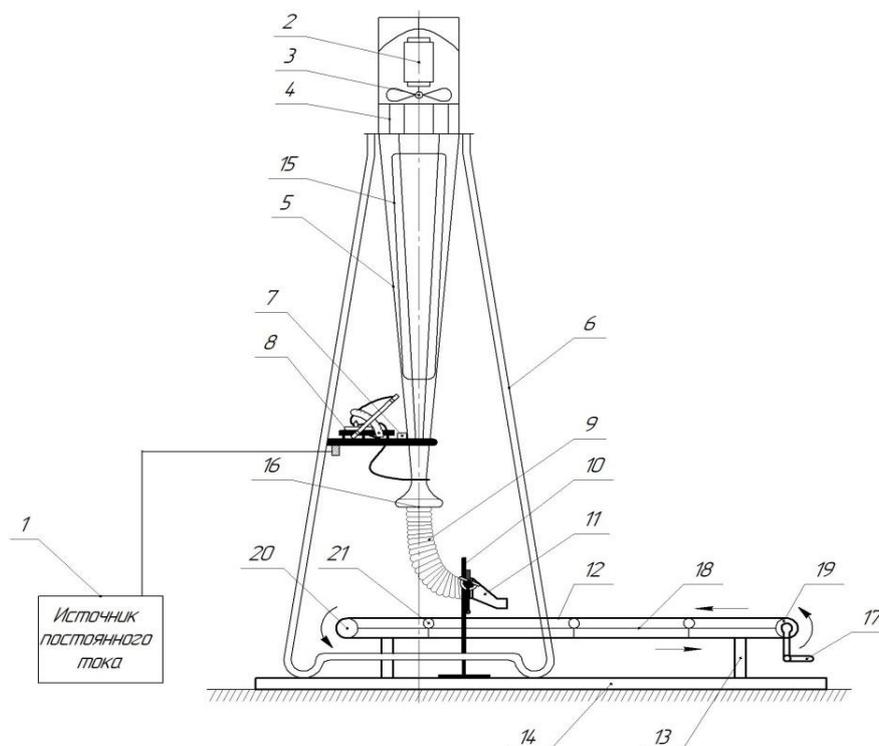


Рис. 1. Общий вид лабораторной установки

От источника постоянного тока 1 (см. рис. 1) через пульт управления 7 подается напряжение на двигатель 2, который приводит во вращение крыльчатку вентилятора 3. Одновременно с пульта управления 7 включается и вертикальная подсветка 15. Перед вентилятором 3 установлена спрямляющая решетка 4, необходимая для стабилизации движения воздушной смеси через витательную трубу 5. К коллектору 16 витательной трубы 5 присоединен микроманометр 8 для измерения вакуумметрического давления в коллекторе 16 трубы. Через экспериментальное сопло 11, присоединенное к коллектору витательной трубы 5 гофрированной алюминиевой трубой 9, может засасываться торфяная крошка фракцией  $d = 0-40$  мм, движущаяся по конвейерной ленте 12. Конвейерная лента 12 механически (при помощи приводной рукоятки 17) приводится в движение навстречу экспериментальному соплу 11. Конвейер состоит из стоек 13, жестко закрепленных к раме установки 14, рамы конвейерной ленты 18, ведущего 19 и натяжного ведомого 20 барабанов, опорных роликов 21.

На рис. 2 показано подключение микроманометра к коллектору 16 витательной трубы 5 (А-А) и взаимное расположение мест установки пульта управления 7, реостата регулирования постоянного напряжения 22 и микроманометра 8 (Б-Б). К раме витательной трубы 6 закреплен стол 23, на котором установлены пульт управления 7, предназначенный для включения двигателя постоянного тока и подсветки в витательной трубе 5, реостат для регулировки напряжения 22, влияющего на скорость всасывания витательной установки, и микроманометр 8. Микроманометр 8 подключен к коллектору 16 витательной трубы 5 при помощи гибкого шланга 24, прикрепленного к штуцеру 25 кольцевого трубопровода 26, установленного вокруг коллектора 16 и соединенного с ним ортогонально расположенными четырьмя патрубками 27, необходимыми для выравнивания показаний давления.

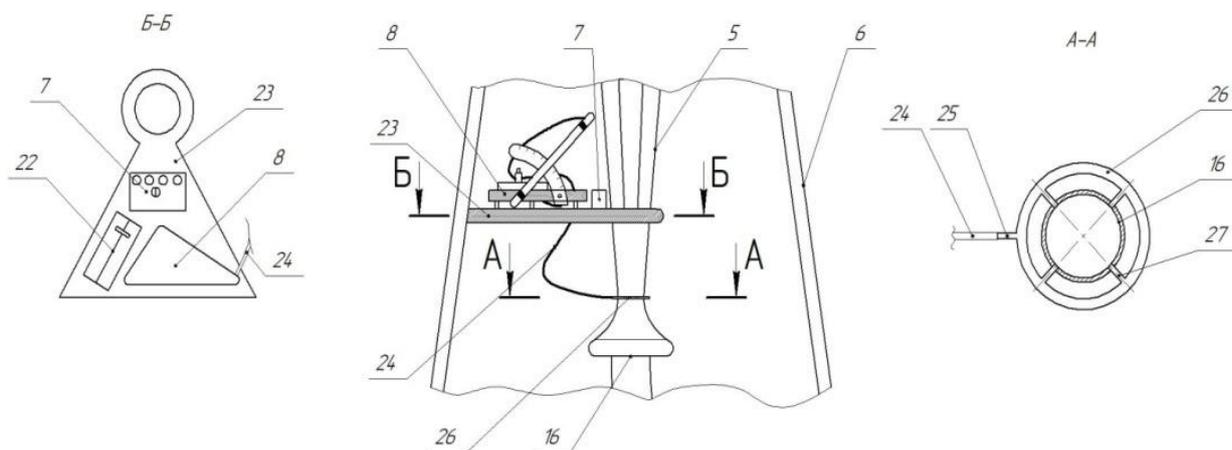


Рис. 2. Схема расположения приборов контроля

На рис. 3 показано крепление экспериментального сопла 11 к стойке 10. Сопло и алюминиевая гофрированная труба 9 соединены между собой муфтой 28, которая закреплена на подвижной штанге 29 и позволяет регулировать угол наклона сопла и расстояния между соплом и поверхностью конвейерной ленты. Для измерения угла наклона сопла установлены угломерная шкала 30 и стрелка с грузом 31. Сопло может поворачиваться на угол  $0-90^\circ$  и подниматься над конвейерной лентой на расстояние  $0-400$  мм.

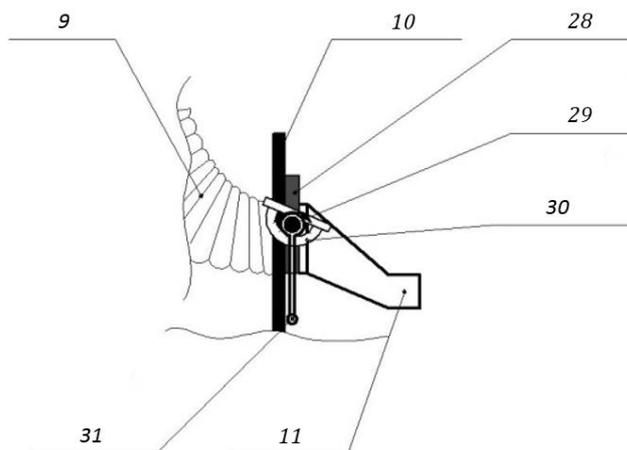


Рис. 3. Крепление всасывающего сопла

Для измерения скорости воздушного потока на различном расстоянии от нижнего края всасывающего сопла по координатной сетке размещается выносной щуп портативного цифрового термоанемометра GM8903 (рис. 4). Методика измерений и прибор описаны в работе [10].



Рис. 4. Координатная сетка на ленте конвейера

Запись скоростей воздушного потока в различных точках всасывающего факела производилась при скорости воздуха на входе в сопло 26,69 м/с, соответствующей условиям реальной машины КТТ-2 [11], эксплуатируемой на предприятии ООО «Пиндstrup» [12]. Расстояние от конвейера до нижней кромки сопла принималось 0 и 25 мм. Угол установки сопла в ходе серии экспериментов изменялся от 10 до 45° с шагом 5°.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В результате обработки серии экспериментальных данных получены две группы кривых, представляющих собой зависимости скорости воздушного потока от удаления от сопла  $x$ , угла установки сопла  $\alpha$  и высоты  $h$  расположения сопла над поверхностью конвейерной ленты 0 и 25 мм (рис. 5, 6).

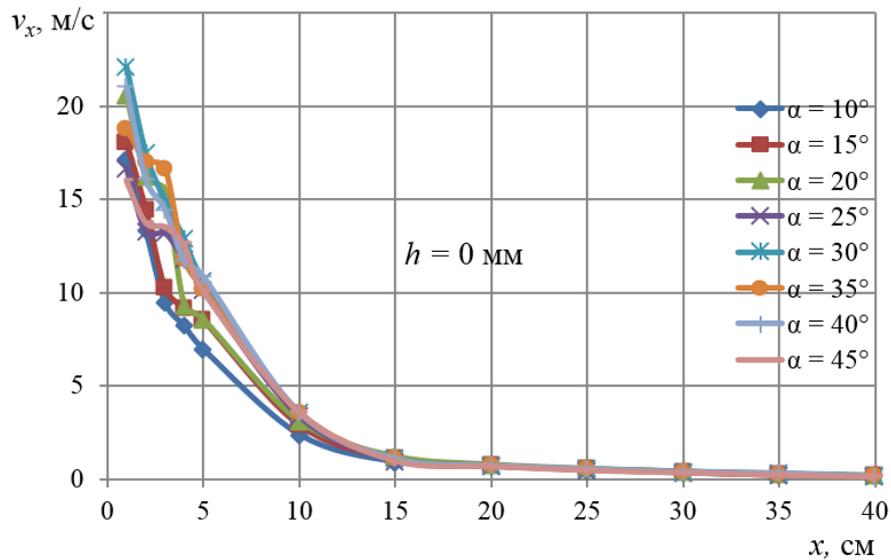


Рис. 5. Зависимость скорости воздушного потока  $v_x$  от удаления от сопла  $x$  при различных углах установки сопла  $\alpha$  и расстоянии от сопла до подстилающей поверхности  $h = 0$  мм

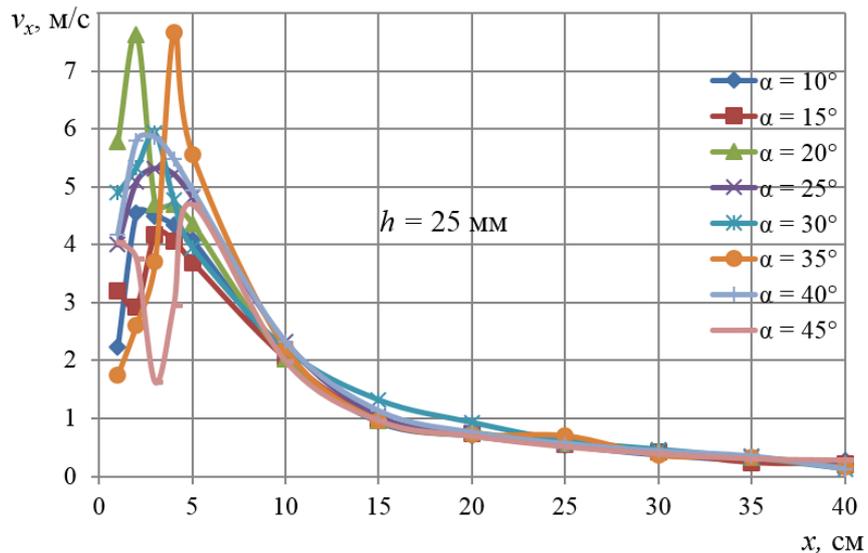


Рис. 6. Зависимость скорости воздушного потока  $v_x$  от удаления от сопла  $x$  при различных углах установки сопла  $\alpha$  и расстоянии от сопла до подстилающей поверхности  $h = 25$  мм

По результатам анализа рис. 5 можно отметить следующее. На расстоянии 10 см от нижнего края сопла скорость воздушного потока понижается в 4,5–7 раз по сравнению со скоростью на расстоянии в 1 см. Скорость воздушного потока менее 1 м/с наблюдается во всех случаях при удалении от сопла на 20 см. При удалении точки замера от сопла на расстояние более 15 см зависимость скорости от расстояния ввиду незначительных колебаний можно считать линейной. Отсутствие характерных «пиков» практически во всех случаях говорит о слабой турбулентности воздушного потока. В незначительной степени турбулентность проявляется возмущениями на кривых с  $\alpha = 15\text{--}45^\circ$ . Наибольшее значение скорости воздушного потока на расстоянии в 1 см от нижнего края сопла наблюдается для угла установки сопла  $\alpha = 30^\circ$ .

По результатам анализа рис. 6 можно отметить следующее. На расстоянии 10 см от нижнего края сопла скорость воздушного потока понижается в 1,5–2 раза по сравнению со скоростью на расстоянии в 1 см. Скорость воздушного потока менее 1 м/с наблюдается в подавляющем большинстве случаев при удалении от сопла на 20 см. Максимальная скорость всасывания наблюдается на расстоянии 2–5 см от нижнего края сопла (в зависимости от угла установки сопла). При удалении точки замера от сопла на расстояние более 20 см зависимость скорости от расстояния ввиду незначительных колебаний можно считать линейной. Наличие характерных «пиков» во всех случаях говорит о сильной турбулентности воздушного потока. Наиболее сильное турбулентное движение проявляется небольшими возмущениями на кривых с  $\alpha = 20\text{--}35^\circ$ . Наибольшее значение скорости воздушного потока на расстоянии в 1 см от нижнего края сопла наблюдаются для углов установки сопла  $\alpha = 20\text{--}45^\circ$  [13].

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам проведенной серии экспериментов можно сделать следующие выводы. Поскольку обеспечить нулевое расстояние между всасывающим соплом и поверхностью расстила торфяной крошки на практике невозможно, следует ограничиться расстоянием в 25 мм, равным максимальному размеру кондиционной торфяной крошки. К тому же слабая турбулентность воздушного потока для нулевого расстояния над подстилающей поверхностью говорит о сложных условиях создания подъемной силы для отрыва частицы от подстилающей поверхности. Предварительным рациональным углом установки сопла по факту значения скорости воздушного потока на данном этапе исследования можно считать  $\alpha = 30 \pm 5^\circ$ . Для более точного экспериментального обоснования рационального угла установки сопла необходимо провести серию экспериментальных работ по оценке всасывания торфяной крошки с заданными свойствами соплами, смонтированными под углами  $10\text{--}45^\circ$ . Такое исследование поможет окончательно сформулировать требования к параметрам установки всасывающего сопла, а следовательно, будет способствовать более рациональному хозяйствованию и бережному обращению с бесценным природным ресурсом, каковым, без сомнения, является торф [14, 15].

### ЛИТЕРАТУРА

1. Лазарев А.В., Корчунов С.С. Справочник по торфу. М.: Недра, 1982. 760 с.
2. Панов В.В., Мисников О.С., Купорова А.В. Проблемы и перспективы развития торфяного производства в Российской Федерации // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2017. № 5. С. 105–117.
3. Chertkova E., Sizova V. Production and Technological Parameters of Milled Peat Extraction Depending on Organization of Peat Machines Operations // *E3S Web of Conferences*. – *EDP Sciences*. 2019. V. 105. P. 01002.
4. Прягаев Ю.В. Есть ли будущее у пневмовалкователя? // *Торф и бизнес*. 2007. № 2 (8). С. 23–26.
5. Горцакалян Л.О. Расчет и конструирование пневматических установок для уборки и транспортировки фрезерного торфа. Калинин: КПИ, 1973. 120 с.
6. Горцакалян Л.О., Чернышев В.В. Исследование скоростного поля всасывающего, нагнетательного и всасывающе-нагнетательного факелов активного сопла пневмоуборочной машины // *Технология и комплексная механизация торфяного производства: межвузовский тематический сборник*. Калинин: КПИ, 1977. С. 28–32.
7. Горцакалян Л.О. Влияние поступательной скорости пневмоуборочной машины на изменение концентрации аэросмеси. *Механизация процессов добычи и*

переработки торфа: труды Калининского политехнического института. М.: ЦНИИТЭСтроймаш, 1974. С. 20–24.

8. Горфин О.С., Фомин К.В. Конвейерный транспорт. Тверь: ТГТУ, 2008. 114 с.

9. Давыдов Л.Р., Селеннов В.Г. О пневматической уборке фрезерного торфа // *Торф и бизнес*. 2008. № 4 (14). С. 24–28.

10. Яблонев А.Л., Щербакова Д.М. Исследование работы всасывающего сопла торфяной пневмоуборочной машины // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2020. № 3 (7). С. 40–49.

11. Яблонев А.Л., Щербакова Д.М. Исследование всасывающего факела торфяной пневмоуборочной машины КТТ-2 // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2019. № 12 (S39). С. 47–58.

12. Гейлер В.Л., Дубовиков С.Л. Опыт работы ЗАО «Росторфинвест» // *Торф и бизнес*. 2006. № 1 (3). С. 18–21.

13. Yablonev A., Misnikov O., Scherbakova D., Goryachev V. Study of the dependence of the air flow velocity on the parameters of the suction nozzle installation of the peat pneumatic harvesting machine // *E3S Web of Conferences. – EDP Sciences*. 2021. V. 278. P. 01021.

14. Kremcheev E.A., Kremcheeva D.A. Technological Approaches to Reducing the Loss of Peat Raw Materials in Fields with Hydrological Regime // *Indian Journal of Science and Technology*. 2016. V. 9. № 12. P. 89525.

15. Singh K. Allocation and Sustainable Management of Peat Resources on Public Land // *AEP Public Land Management*. 2016. № 9. P. 1–14.

**Для цитирования:** Яблонев А.Л., Щербакова Д.М. Обоснование параметров установки сопла торфяной пневмоуборочной машины над подстилающей поверхностью залежи // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2021. № 4 (12). С. 38–45.

## **JUSTIFICATION OF PARAMETERS FOR INSTALLING THE NOZZLE OF A PEAT PNEUMATIC HARVESTER ABOVE THE UNDERLAYING SURFACE**

A.L. YABLONEV, Dr. Sc., D.M. SCHERBAKOVA, Postgraduate

Tver State Technical University, 22, Af. Nikitin emb.,  
170026, Tver, Russian Federation, e-mail: alvovich@mail.ru

The parameters affecting the efficiency of suction of peat crumb by pneumatic harvesters are listed. Among them are the height of the nozzle above the underlying surface of the deposit and the angle of the nozzle. Since there is very little information and recommendations on the rational values of these parameters, a laboratory experiment was carried out, using a specially created installation to assess the air flow rate, depending on the distance from the nozzle, the angle of the nozzle and the height of the nozzle above the underlying surface of the deposit. The results of the experiment are presented. It is shown, that it is impossible to reproduce the zero distance from the nozzle to the underlying surface in practice; therefore, it is recommended to limit the height of 25 mm, which is equal to the maximum size of the conditioned peat crumb. It is noted, that for more accurate results, it is necessary to carry out the following series of experimental works to assess the parameters of suction of peat chips with specific physical and mechanical characteristics by the nozzle.

**Keywords:** peat, pneumatic peat harvester, suction nozzle, air flow velocity, anemometer, peat crumb, height of the nozzle above the underlying surface of the deposit.

*Вестник Тверского государственного технического университета.  
Серия «Технические науки». № 4 (12), 2021*

## REFERENCES

1. Lazarev A.V., Korchunov S.S. Spravochnik po torfu [Peat handbook]. Moscow: Nedra, 1982. 760 p.
2. Panov V.V., Misnikov O.S., Kuporova A.V. Problems and prospects for the development of peat production in the Russian Federation. *Gorniy Informatsionno-analitichesky byulleten (nauchno-tehnicheskiy zhurnal)*. 2017. No. 5, pp. 105–117. (In Russian).
3. Chertkova E., Sizova V. Production and Technological Parameters of Milled Peat Extraction Depending on Organization of Peat Machines Operations. *E3S Web of Conferences*. – *EDP Sciences*. 2019. V. 105. P. 01002.
4. Priagayev Yu.V. Does the pneumatic roller have a future? *Torf i biznes*. 2007. No. 2 (8), pp. 23–26. (In Russian).
5. Gortsakalyan L.O. Raschet i konstruirovaniye pnevmaticheskoy ustanovki dlia uborki i transportirovki frezernogo torfa [Calculation and design of pneumatic installations for harvesting and transporting milled peat]. Kalinin: KPI, 1973. 120 p.
6. Gortsakalyan L.O., Chernishov V.V. Study of the Speed Field of the Suction, Pumping and Suction-Pumping Torches of the Active Nozzle of the Pneumatic Harvester. *Tekhnologiya i kompleksnaya mekhanizatsiya torfyanogo proizvodstva: mezhvuzovskiy tematicheskiy sbornik*. Kalinin: KPI, 1977, pp. 28–32. (In Russian).
7. Gortsakalyan L.O. Effect of the Progressive Speed of the Pneumatic Harvester on the Change in the Concentration of the Aircraft Mix. *Mekhanizatsiya protsessov dobychi i pererabotki torfa: trudy Kalininskogo politehnicheskogo instituta*. Moscow: TSNIITESTroy mash, 1974, pp. 20–24. (In Russian).
8. Gorfin O.S., Fomin K.V. Konveyernyi transport [Conveyor transport]. Tver: TSTU, 2008. 114 p.
9. Davidov L.R., Selenov V.G. About pneumatic harvesting of milled peat. *Torf i biznes*. 2008. No. 4 (14), pp. 24–28. (In Russian).
10. Yablonev A.L., Scherbakova D.M. Study of the operation of the suction nozzle of a peat pneumatic harvester. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya «Tekhnicheskiye nauki»*. 2020. No. 3 (7), pp. 40–49. (In Russian).
11. Yablonev A.L., Scherbakova D.M. Investigation of the suction torch of the KTT-2 peat pneumatic harvester. *Gorniy Informatsionno-analitichesky byulleten (nauchno-tehnicheskiy zhurnal)*. 2019. No. 12 (S39), pp. 47–58. (In Russian).
12. Geiler V.L., Dubovikov S.L. Experience of CJSC «Rostorfinvest». *Torf i biznes*. 2006. No. 1 (3), pp. 18–21. (In Russian).
13. Yablonev A., Misnikov O., Scherbakova D., Goryachev V. Study of the dependence of the air flow velocity on the parameters of the suction nozzle installation of the peat pneumatic harvesting machine. *E3S Web of Conferences*. – *EDP Sciences*, 2021. V. 278. P. 01021.
14. Kremcheev E.A., Kremcheeva D.A. Technological Approaches to Reducing the Loss of Peat Raw Materials in Fields with Hydrological Regime. *Indian Journal of Science and Technology*. 2016. V. 9. No. 12, p. 89525.
15. Singh K. Allocation and Sustainable Management of Peat Resources on Public Land. *AEP Public Land Management*. 2016. No. 9, pp. 1–14.

Поступила в редакцию/received: 12.07.2021; после рецензирования/revised: 24.09.2021;  
принята/accepted: 30.09.2021

## АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ НЕТОЧНОСТИ РАСПОЛОЖЕНИЯ И РАЗМЕРОВ РЕЗЦОВ НА РАБОЧЕМ ОРГАНЕ ТОРФЯНОГО ФРЕЗЕРУЮЩЕГО АГРЕГАТА НА ЧАСТОТНЫЕ СВОЙСТВА МОМЕНТА СОПРОТИВЛЕНИЯ

К.В. ФОМИН, д-р техн. наук

Тверской государственной технической университет,  
170026, Тверь, наб. Аф. Никитина, д. 22, e-mail: fomin\_tver@mail.ru

© Фомин К.В., 2021

В статье предложена модель формирования момента сопротивления, учитывающая периодический характер взаимодействия резцов с торфяной залежью, случайные условия и режимы работы агрегата, влияние погрешностей расстановки ножей на корпусе фрезы и их размеров, связанных с изготовлением и монтажом исполнительного органа, а также износом или необратимыми деформациями режущих элементов. На основе модели получены выражения для расчета спектральной плотности момента и исследовано влияние ошибок на его частотные свойства. Отклонение геометрических параметров от «идеальных» значений приводит к появлению дополнительных составляющих на частотах, кратных угловой скорости вращения фрезы в спектральной плотности момента сопротивления. Их величина пропорциональна суммарной погрешности расстановки ножей по углу и суммарной величине отношений ошибок высоты ножа к подаче. Эти факторы необходимо принимать во внимание для агрегатов, работающих при небольших подачах, и рабочих органов с большим числом режущих элементов, а также при расчете динамических нагрузок в элементах конструкции, если собственные частоты системы совпадают или кратны угловой скорости фрезы.

*Ключевые слова:* торфяной фрезерующий агрегат, фреза, ошибка расположения ножей, ошибка высоты резца, модель нагрузки, спектральная плотность.

**DOI: 10.46573/2658-5030-2021-4-46-56**

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время фрезерующие агрегаты нашли широкое применение в различных технологических процессах торфяной промышленности [1–3]. Они обеспечивают высокое качество работ, большую производительность и создают предпосылки для комплексной механизации выполняемых операций [2, 3].

В процессе эксплуатации в элементах конструкции торфяных машин с исполнительными органами фрезерного типа действуют значительные динамические нагрузки [4], что приводит к снижению их надежности [5] и ухудшению технико-экономических показателей работы. Основной причиной возбуждения динамических нагрузок является действие сил и моментов на рабочих органах. Они носят резкопеременный и случайный характер [4, 6], который связан с периодическим взаимодействием ножей фрезы с торфяной залежью и древесными включениями [7], а также случайными условиями и режимами работы агрегата [4, 6, 7].

Кроме этого, при определенных условиях на процесс формирования нагрузок может оказывать влияние неточность изготовления и монтажа исполнительного органа. При этом в процессе эксплуатации происходит деградация многих его характеристик, изменяются его геометрические размеры за счет износа или

необратимых деформаций режущих элементов. Последние имеют разную высоту, углы резания и расположены на корпусе фрезы с небольшим сдвигом. Это приводит к трансформации величины и характера силовых факторов на рабочем органе и в элементах конструкции машины.

Таким образом, анализ влияния неточности изготовления рабочего органа и изменения геометрических параметров режущих элементов в процессе работы на величину и частотный состав нагрузки, ее вероятностные характеристики является актуальной задачей.

### МАТЕРИАЛЫ, МОДЕЛИ И МЕТОДЫ

Если учитывать случайный характер момента на исполнительном органе, расчет динамических нагрузок в элементах конструкции фрезерующего агрегата и анализ показателей его надежности [4, 8] должны основываться на методах теории вероятности [8–10] и статистической динамики механических систем [11–13]. Опыт применения этих методов при решении задач в отраслях горной промышленности [4, 14, 15] показывает, что имеется возможность на практике ограничиться рассмотрением только одномерных и двумерных характеристик процессов при использовании как аналитических и численных методов, так и 3D-моделирования [16–18]. В расчет при этом принимают вероятностные характеристики силовых факторов, такие как дисперсии и спектральные плотности [14, 16, 18].

Для оценки качественной картины влияния погрешности расположения ножей и их размеров рассмотрим фрезу с горизонтальной осью вращения (рис. 1), одной плоскостью резания и  $K$  ножами (применяют, например, в машинах для добычи кускового формованного торфа). Радиус рабочего органа –  $R_\phi$ ; глубина фрезерования –  $H_\phi$ ; скорость движения агрегата –  $W$ ; угловая скорость фрезы –  $\omega_\phi$ .

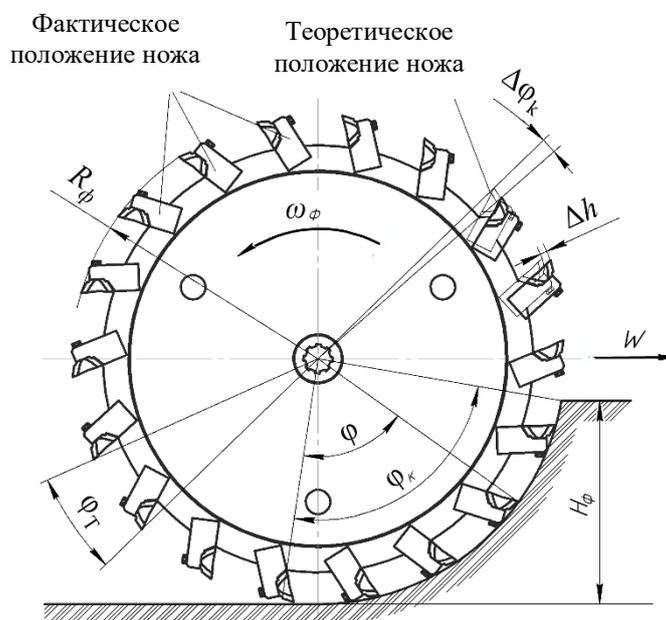


Рис. 1. Схема расположения ножей на рабочем органе

**Влияние погрешности расстановки ножей.** Учитывая плавность изменения физико-механических свойств торфа, глубины фрезерования и скорости перемещения в течение нескольких оборотов фрезы [4] (так, что в пределах длительности одного оборота эти параметры можно считать примерно постоянными), для момента нагружения имеем (рис. 2):

$$M(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} M_n(t - nT_0; P_n), \quad (1)$$

где  $n$  – номер импульса нагружения;  $T_0$  – длительность одного оборота рабочего органа ( $T_0 = 2\pi/\omega_\phi$ );  $M_n(t; P_n)$  – функция, описывающая момент сопротивления в пределах  $n$ -го оборота фрезы:

$$M_n(t; P) = \sum_{k=1}^K M_0(t - t_{0k}; P_n),$$

где  $K$  – количество резцов;  $M_0(t; P)$  – момент на ноже в пределах угла контакта с залежью;  $t_{0k}$  – момент появления  $k$ -го импульса нагрузки (с учетом технологической ошибки изготовления и деградации геометрических параметров режущих элементов в процессе работы) ( $t_{0k} = [(k-1)\varphi_T + \Delta\varphi_k]/\omega_\phi$ , где  $\varphi_T$  – угол между режущими элементами («идеальный» рабочий орган);  $\Delta\varphi_k$  – ошибка, связанная с углом установки ножа;  $\omega_\phi$  – угловая скорость вращения фрезы);  $P_n$  – случайные параметры  $n$ -го импульса (для  $n$ -го оборота фрезы).

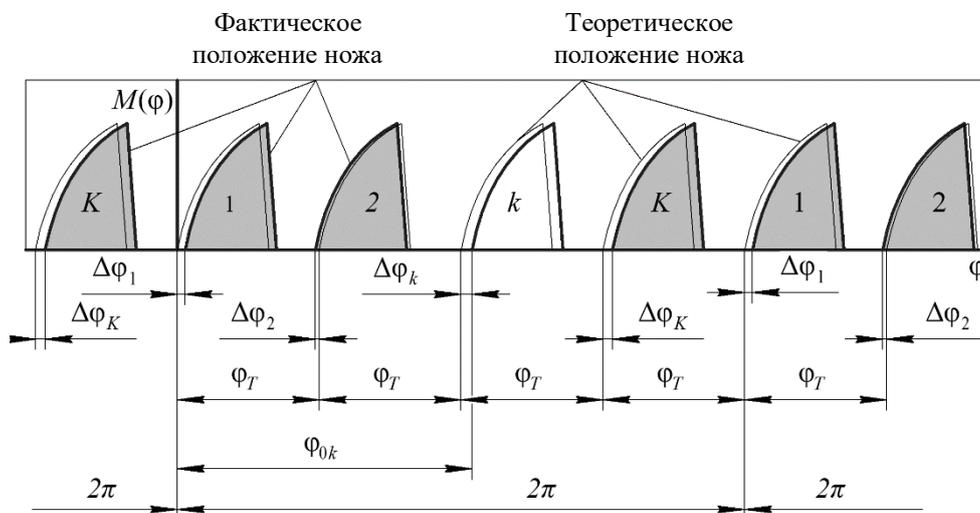


Рис. 2. Модель момента сопротивления с учетом погрешности расположения ножей на рабочем органе

Параметры импульсов являются случайными. Их вероятностные характеристики зависят от конструкции рабочего органа, его угловой скорости, профиля поверхности карты, глубины фрезерования, физико-механических свойств торфа, колебаний, вызванных силами резания и дисбалансом фрезы [4].

Используя подходы, предложенные в [4, 19, 20], для спектральной плотности момента сопротивления с учетом статистической связи между однородными

параметрами импульсов и учетом погрешности угла положения режущих элементов на корпусе фрезы, описываемой моделью (1), можно записать:

$$\begin{aligned}
 S_M(\omega) = & \frac{2}{T_0} \left( \frac{1}{2} \sum_{q=1}^Q \left[ \frac{\partial^2 f_1(\omega; P)}{\partial P_q^2} \right]_m D_q - \frac{1}{2} \sum_{q=1}^Q \left[ \frac{\partial^2 f_2(\omega; P)}{\partial P_q^2} \right]_m D_q + \right. \\
 & + \lim_{N \rightarrow \infty} 2 \sum_{p=1}^{2N} \left( 1 - \frac{p}{2N+1} \right) \operatorname{Re} \sum_{q < s} \left[ \frac{\partial^2 f_2(\omega; P)}{\partial P_q \partial P_s} \right]_m K_{qsp} \exp(-j\omega p T_0) + \\
 & \left. + \left\{ f_1(\omega; m_q) + \frac{1}{2} \sum_{q=1}^Q \left[ \frac{\partial^2 f_2(\omega; P)}{\partial P_q^2} \right]_m D_q \right\} \frac{2\pi}{T_0} \sum_{r=-\infty}^{\infty} \delta \left( \omega - \frac{2\pi r}{T_0} \right) \right), \omega \neq 0, \quad (2)
 \end{aligned}$$

где  $Q$  – количество параметров;  $m_q$ ,  $D_q$ ,  $K_{qsp}$  – математические ожидания, дисперсии, корреляционные моменты параметров импульсов;

$$\begin{aligned}
 f_1(\omega; P) &= |S_{Mn}(j\omega; P)|^2; \\
 f_2(\omega; P) &= S_{Mn}(j\omega; P_{qn}) S_{Mn}^*(j\omega; P_{s;n-p}),
 \end{aligned}$$

где знаком \* отмечена комплексно-сопряженная величина;  $S_{Mn}(j\omega; P_n)$  – спектр момента на фрезе в течение одного оборота:

$$S_{Mn}(\omega; P) = S_0(\omega; P_n) \sum_{k=1}^K \exp \left( -j \frac{\omega}{\omega_\phi} \varphi_{ok} \right), \quad (3)$$

где  $\varphi_{ok}$  – углы между началом отсчета и  $k$ -м элементом (рис. 2) (с учетом погрешности расположения ножа);  $S_0(\omega)$  – спектр нагрузки при одиночном акте взаимодействия ножа с залежью:

$$S_0(j\omega; P) = \int_0^{\varphi_k/\omega_\phi} M_0(t; P) \exp(-j\omega t) d\varphi,$$

где  $\varphi_k$  – угол контакта резца с залежью.

Подставляя выражение (3) в (2) и преобразуя, для спектральной плотности получим

$$\begin{aligned}
 S_M(\omega) = & \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^K \exp \left( -j \frac{\omega}{\omega_\phi} (\varphi_{ok} - \varphi_{ol}) \right) \times \\
 & \times \frac{2}{T_0} \left( \frac{1}{2} \sum_{q=1}^Q \left[ \frac{\partial^2 F_1(\omega; P)}{\partial P_q^2} \right]_m D_q - \frac{1}{2} \sum_{q=1}^Q \left[ \frac{\partial^2 F_2(\omega; P)}{\partial P_q^2} \right]_m D_q + \right. \\
 & + \lim_{N \rightarrow \infty} 2 \sum_{p=1}^{2N} \left( 1 - \frac{p}{2N+1} \right) \operatorname{Re} \sum_{q < s} \left[ \frac{\partial^2 F_2(\omega; P)}{\partial P_q \partial P_s} \right]_m K_{qsp} \exp(-j\omega p T_0) + \\
 & \left. + \left\{ F_1(\omega; m_q) + \frac{1}{2} \sum_{q=1}^Q \left[ \frac{\partial^2 F_2(\omega; P)}{\partial P_q^2} \right]_m D_q \right\} \frac{2\pi}{T_0} \sum_{r=-\infty}^{\infty} \delta \left( \omega - \frac{2\pi r}{T_0} \right) \right), \omega \neq 0,
 \end{aligned}$$

где  $F_1(\omega; P) = |S_0(j\omega; P)|^2$ ;  $F_2(\omega; P) = S_0(j\omega; P_{qn}) S_0^*(j\omega; P_{s;n-p})$ .

Для оценки влияния погрешности расположения ножей на корпусе фрезы разложим  $\exp\left(-j\frac{\omega}{\omega_\phi}\varphi_{0k}\right) = \exp\left(-j\frac{\omega}{\omega_\phi}[(k-1)\varphi_T + \Delta\varphi_k]\right)$  в ряд Тейлора (учитывая малость  $\Delta\varphi_k$  по сравнению с  $\varphi_T$ ) в окрестности точки  $k\varphi_T$  и ограничимся линейным членом:

$$\begin{aligned} & \exp\left(-j\frac{\omega}{\omega_\phi}[(k-1)\varphi_T + \Delta\varphi_k]\right) = \\ & = \exp\left[-j\frac{\omega}{\omega_\phi}(k-1)\varphi_T\right] \exp\left(-j\frac{\omega}{\omega_\phi}\Delta\varphi_k\right) \approx \\ & \approx \exp\left[-j\frac{\omega}{\omega_\phi}(k-1)\varphi_T\right] \left[1 - j\frac{\omega}{\omega_\phi}\Delta\varphi_k\right]. \end{aligned}$$

Учитывая, что [9]

$$\sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^K \exp\left(-j\frac{\omega}{\omega_\phi}\varphi_T(k-l)\right) = \frac{\sin^2(K\omega\varphi_T/2\omega_\phi)}{\sin^2(\omega\varphi_T/2\omega_\phi)}, \quad \varphi_T = 2\pi/K,$$

$$\frac{\sin^2(K\omega\varphi_T/2\omega_\phi)}{K^2 \sin^2(\omega\varphi_T/2\omega_\phi)} \sum_{r=-\infty}^{\infty} \delta\left(\omega - \frac{2\pi r}{T_0}\right) = \sum_{\rho=-\infty}^{\infty} \delta\left(\omega - \frac{2\pi\omega_\phi\rho K}{2\pi}\right) = \sum_{\rho=-\infty}^{\infty} \delta\left(\omega - \frac{2\pi\rho}{T}\right),$$

окончательно получим

$$\begin{aligned} S_M(\omega) &= \frac{2}{T} \left\{ \frac{1}{2} \sum_{q=1}^Q \left[ \frac{\partial^2 F_1(\omega; P)}{\partial P_q^2} \right]_m D_q - \frac{1}{2} \sum_{q=1}^Q \left[ \frac{\partial^2 F_2(\omega; P)}{\partial P_q^2} \right]_m D_q + \right. \\ &+ \lim_{N \rightarrow \infty} 2 \operatorname{Re} \sum_{p=1}^{2N} \left( 1 - \frac{p}{2N+1} \right) \sum_{q < s} \left[ \frac{\partial^2 F_2(\omega; P)}{\partial P_q \partial P_s} \right]_m K_{qsp} \exp(-j\omega p T) + \\ &+ \left. \left\{ F_1(\omega; P_m) + \frac{1}{2} \sum_{q=1}^Q \left[ \frac{\partial^2 F_2(\omega; P)}{\partial P_q^2} \right]_m D_q \right\} \frac{2\pi}{T} \sum_{r=-\infty}^{\infty} \delta\left(\omega - \frac{2\pi r}{T}\right) \right\} + \\ &+ \left( \frac{\omega}{\omega_\phi} \right)^2 \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^K \Delta\varphi_k \Delta\varphi_l \exp\left(-j\frac{\omega}{\omega_\phi}\varphi_T(k-l)\right) \times \\ &\times \frac{2}{T_0} \left\{ \frac{1}{2} \sum_{q=1}^Q \left[ \frac{\partial^2 F_1(\omega; P)}{\partial P_q^2} \right]_m D_q - \frac{1}{2} \sum_{q=1}^Q \left[ \frac{\partial^2 F_2(\omega; P)}{\partial P_q^2} \right]_m D_q + \right. \\ &+ \lim_{N \rightarrow \infty} 2 \sum_{p=1}^{2N} \left( 1 - \frac{p}{2N+1} \right) \operatorname{Re} \sum_{q < s} \left[ \frac{\partial^2 F_2(\omega; P)}{\partial P_q \partial P_s} \right]_m K_{qsp} \exp(-j\omega p T_0) + \\ &+ \left. \left( F_1(\omega; P_m) + \frac{1}{2} \sum_{q=1}^Q \left[ \frac{\partial^2 F_2(\omega; P)}{\partial P_q^2} \right]_m D_q \right) \frac{2\pi}{T_0} \sum_{r=-\infty}^{\infty} \delta\left(\omega - \frac{2\pi r}{T_0}\right) \right\}, \end{aligned} \quad (4)$$

где  $T$  – период повторности импульсов нагрузки ( $T = \Phi_T / \omega_\phi$ ).

В выражении (4) первые четыре члена описывают спектральную плотность момента для «идеального» рабочего органа, а остальные учитывают влияние погрешности расстановки ножей.

**Влияние погрешности размеров режущих элементов.** Различие в высоте резцов, связанное с ошибками их изготовления и монтажа, а также с их неравномерным износом (см. рис. 1), приводит к изменению величины подачи для каждого режущего элемента. Учитывая, что амплитуда импульса пропорциональна подаче [4, 20], для момента сопротивления в пределах одного оборота рабочего органа имеем

$$M_n(t) = \sum_{k=1}^K \frac{c + (h_k - h_{k+1})}{c} M_0(t - t_k; P_n),$$

где  $c$  – подача на нож, когда высота их одинакова;  $h_k$  – отклонение высоты  $k$ -го режущего от «идеального» значения;  $t_k = (k-1)\Phi_T / \omega_\phi$  – момент возникновения  $k$ -го импульса.

Следовательно, для спектра момента  $M_n(t)$  можно записать

$$S_{Mn}(\omega; P) = S_0(\omega; P) \sum_{k=1}^K \frac{c + \Delta h_k}{c} \exp\left[-j \frac{\omega}{\omega_\phi} (k-1)\Phi_T\right], \quad (5)$$

где  $\Delta h_k$  – разница в высоте между отклонениями от «идеального» значения для соседних ножей.

Подставляя выражение (5) в формулу (2) и используя подходы, представленные в статьях [20, 21], для спектральной плотности имеем

$$\begin{aligned} S_M(\omega) = & \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^K \frac{(c + \Delta h_k)(c + \Delta h_l)}{c^2} \exp\left(-j \frac{\omega}{\omega_\phi} \omega(k-l)\Phi_T\right) \times \\ & \times \frac{2}{T_0} \left( \frac{1}{2} \sum_{q=1}^Q \left[ \frac{\partial^2 F_1(\omega; P)}{\partial P_q^2} \right]_m D_q - \frac{1}{2} \sum_{q=1}^Q \left[ \frac{\partial^2 F_2(\omega; P)}{\partial P_q^2} \right]_m D_q + \right. \\ & + \lim_{N \rightarrow \infty} 2 \sum_{p=1}^{2N} \left( 1 - \frac{p}{2N+1} \right) \operatorname{Re} \sum_{q < s} \left[ \frac{\partial^2 F_2(\omega; P)}{\partial P_q \partial P_s} \right]_m K_{qsp} \exp(-j\omega p T_0) + \\ & \left. + \left\{ F_1(\omega; m_q) + \frac{1}{2} \sum_{q=1}^Q \left[ \frac{\partial^2 F_2(\omega; P)}{\partial P_q^2} \right]_m D_q \right\} \frac{2\pi}{T_0} \sum_{r=-\infty}^{\infty} \delta\left(\omega - \frac{2\pi r}{T_0}\right) \right), \omega \neq 0. \end{aligned}$$

Преобразуя, получим

$$\begin{aligned} S_M(\omega) = & \frac{2}{T} \left( \frac{1}{2} \sum_{q=1}^Q \left[ \frac{\partial^2 F_1(\omega; P)}{\partial P_q^2} \right]_m D_q - \frac{1}{2} \sum_{q=1}^Q \left[ \frac{\partial^2 F_2(\omega; P)}{\partial P_q^2} \right]_m D_q + \right. \\ & + \lim_{N \rightarrow \infty} 2 \sum_{p=1}^{2N} \left( 1 - \frac{p}{2N+1} \right) \operatorname{Re} \sum_{q < s} \left[ \frac{\partial^2 F_2(\omega; P)}{\partial P_q \partial P_s} \right]_m K_{qsp} \exp(-j\omega p T) + \\ & \left. + \left\{ F_1(\omega; m_q) + \frac{1}{2} \sum_{q=1}^Q \left[ \frac{\partial^2 F_2(\omega; P)}{\partial P_q^2} \right]_m D_q \right\} \frac{2\pi}{T} \sum_{r=-\infty}^{\infty} \delta\left(\omega - \frac{2\pi r}{T}\right) \right) + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^K \left( \frac{\Delta h_k}{c} + \frac{\Delta h_l}{c} + \frac{\Delta h_k \Delta h_l}{c^2} \right) \exp \left[ -j \frac{\omega}{\omega_\phi} \varphi_T (k-l) \right] \times \\
& \times \frac{2}{T_0} \left( \frac{1}{2} \sum_{q=1}^Q \left[ \frac{\partial^2 F_1(\omega; P)}{\partial P_q^2} \right]_m D_q - \frac{1}{2} \sum_{q=1}^Q \left[ \frac{\partial^2 F_2(\omega; P)}{\partial P_q^2} \right]_m D_q + \right. \\
& + \lim_{N \rightarrow \infty} 2 \sum_{p=1}^{2N} \left( 1 - \frac{p}{2N+1} \right) \operatorname{Re} \sum_{q < s} \left[ \frac{\partial^2 F_2(\omega; P)}{\partial P_q \partial P_s} \right]_m K_{qsp} \exp(-j\omega p T_0) + \\
& \left. + \left\{ F_1(\omega; m_q) + \frac{1}{2} \sum_{q=1}^Q \left[ \frac{\partial^2 F_2(\omega; P)}{\partial P_q^2} \right]_m D_q \right\} \frac{2\pi}{T_0} \sum_{r=-\infty}^{\infty} \delta \left( \omega - \frac{2\pi r}{T_0} \right) \right), \omega \neq 0. \quad (6)
\end{aligned}$$

Первые четыре члена в выражении (6) описывают спектральную плотность момента сопротивления для «идеального» рабочего органа без учета влияния погрешности размеров режущих элементов.

Выражения (4) и (6) дают возможность на стадии проектирования определить влияние ошибок, допущенных при монтаже, изготовлении и изменении конструктивных параметров резцов в процессе эксплуатации, на спектральную плотность момента на фрезе и, соответственно, в элементах конструкции агрегата.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Разработанные модели и полученные на их основе выражения для расчета спектральных плотностей позволяют выделить некоторые особенности момента на рабочем органе.

Анализ выражений (4), (6) показывает, что при учете погрешностей расстановки ножей и отклонения их высоты от «идеального» значения, которые связаны как с ошибками, допущенными при изготовлении и монтаже, так и с изменениями геометрических размеров, вызванными износом или необратимыми деформациями, происходит обогащение частотного состава нагрузки и увеличение ее дисперсии. При этом в спектральной плотности можно выделить две составляющие: первая соответствует случаю, когда ножи установлены через равные углы относительно друг друга и имеют одинаковую высоту («идеальный» рабочий орган), а вторая учитывает влияние погрешности расположения и размеров.

Спектральная плотность момента для «идеального рабочего органа» имеет три части.

Первая состоит из слагаемых, пропорциональных дисперсиям параметров. Ее величина зависит от квадрата модуля спектра момента на резце при взаимодействии с торфяной залежью. Занимаемый этой частью диапазон частот можно оценить с помощью выражения  $\Delta f \approx 1/\tau$ , где  $\tau$  – длительность импульсов нагружения.

Вторая определяется корреляционными моментами параметров. Частотный состав определяется также и спектром момента на резце  $S_0(j\omega; P)$ .

Третья часть спектральной плотности обусловлена периодическим взаимодействием режущих элементов с залежью (кинематическая составляющая). Ее значение пропорционально квадратам средних значений параметров импульсов. Она представляет собой последовательность дискретных линий (их величина определяется спектром  $S_0(j\omega; P)$ ), лежащих на частотах  $\omega_r = 2\pi r/T$ ,  $r = 1, 2, 3, \dots$ , т.е. проявляется на частотах, кратных периоду взаимодействия ножей с залежью.

Погрешность размещения режущих элементов и их размеров приводит к возникновению дополнительных составляющих на частотах, кратных угловой скорости фрезы  $\omega_r = 2\pi r/T_0$ , где  $r = 1, 2, 3, \dots$ , в спектральной плотности момента. При этом значение спектральной плотности момента в случае учета погрешности расположения пропорционально

$$\left(\frac{\omega}{\omega_\phi}\right)^2 \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^K \Delta\varphi_k \Delta\varphi_l \exp\left(-j \frac{\omega}{\omega_\phi} \varphi_T (k-l)\right),$$

а при учете отклонения высоты режущих элементов от «идеальной» спектральная плотность зависит от суммарной величины отношения ошибок к подаче:

$$\sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^K \left(\frac{\Delta h_k}{c} + \frac{\Delta h_l}{c} + \frac{\Delta h_k \Delta h_l}{c^2}\right) \exp\left(-j \frac{\omega}{\omega_\phi} \varphi_T (k-l)\right).$$

Приведенные результаты теоретических исследований согласуются с выводами, сделанными на основе экспериментальных работ, посвященных анализу влияния погрешности размещения и размеров ножей на величину и характер нагрузок на фрезу [4].

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье предложены модели формирования момента сопротивления на рабочем органе фрезерующего агрегата. Они учитывают периодический характер взаимодействия резцов с торфяной залежью, случайные условия и режимы работы машины, влияние погрешностей расположения ножей и их размеров, которые вызваны ошибками, допущенными при изготовлении и монтаже исполнительного органа, а также износом или необратимыми деформациями режущих элементов. На их основе получены зависимости для расчета спектральной плотности момента сопротивления.

Показано, что погрешности размещения резцов и их размеров приводят к возникновению дополнительных составляющих в спектре на частотах, кратных угловой скорости фрезы. Их величина определяется суммарной погрешностью расстановки режущих элементов по углу и отношением ошибок высоты ножа к подаче.

Эти факты необходимо принимать во внимание при проектировании фрезерующих агрегатов, работающих при малых подачах, для фрез с большим числом режущих элементов и в случае, если величины собственных частот элементов конструкции агрегата близки или кратны значениям угловой скорости рабочего органа.

Кроме того, представленный подход с учетом этих факторов может быть полезен для обоснования диагностических признаков оценки технического состояния фрезерующего агрегата.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Misnikov O.S. Basic technologies and equipment used for peat deposit development in foreign countries // *E3S Web of Conferences. – EDP Sciences*. 2018. V. 41. P. 01046.
2. Самсонов Л.Н. Фрезерование торфяной залежи. М.: Недра, 1985. 211 с.
3. Копенкин В.Д., Копенкина Л.В., Самсонов Л.Н. Развитие фрезерующих машин в торфяном производстве (анализ, перспективы) // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2003. № 10. С. 204–207.

4. Самсонов Л.Н., Фомин К.В. Элементы статистической динамики торфяных фрезерующих агрегатов. Тверь: ТГТУ, 2005. 168 с.
5. Горлов И.В., Рахутин М.Г. Влияние пнистости залежи на безотказность торфяных машин // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2017. № 12. С. 139–145.
6. Михайлов А.В., Родионов Е.А., Звонарев И.Е. Анализ условий вертикальной выемки торфяного сырья // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2019. № 1. С. 48–54.
7. Michailov A.V., Zhigulskaaya A.I., Garmaev O.M. An integrated approach to strip mining of peat // *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 2019. V. 378:012087. P. 24–27.
8. Гусев А.С. Вероятностные методы в механике машин и конструкций. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. 224 с.
9. Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники. М.: Радио и связь, 1989. 656 с.
10. Howard R.M. Principles of random signal analysis and low noise design: The power spectral density and its applications. Wiley, 2002. 310 p.
11. Lalanne C. Mechanical Vibration and Shock Analysis, Random Vibration (3rd Edition). John Wiley & Sons, Ltd, 2014. 595 p.
12. Svetlitsky V.A. Statistical dynamics and reliability theory for mechanical structures. Springer, Berlin/Heidelberg, 2003. 452 p.
13. Lutes L.D., Sarkani S. Random vibrations: analysis of structural and mechanical systems. Butterworth-Heinemann, 2004. 635 p.
14. Докукин А.В., Красников Ю.Д., Хургин З.Я. Статистическая динамика горных машин. М.: Машиностроение, 1978. 238 с.
15. Красников Ю.Д. Моделирование разрушения углей режущими инструментами. М.: Наука, 1981. 181 с.
16. Liu C.S., Li D.G., Chen X.P. Shearer Load Identification of the Load Spectrum of the Pick Based on Chaotic Characteristics // *Advanced Materials Research. – Trans Tech Publications Ltd*. 2011. V. 199. P. 111–114.
17. Medolago A., Melzi S. A flexible multi-body model of a surface miner for analyzing the interaction between rock-cutting forces and chassis vibrations // *International Journal of Mining Science and Technology*. 2021. V. 31. № 3. P. 365–375.
18. Li X.H., Yu X.W., Ma X.H., Zhao Y.B. Simulation and Study of Random Loads on Continuous Miner Cutting Drum // *Advanced Materials Research. – Trans Tech Publications Ltd*. 2011. V. 308. P. 1885–1888.
19. Самсонов Л.Н., Фомин К.В. Определение вероятностных характеристик момента нагружения на рабочем органе торфяного фрезерующего агрегата // *Известия высших учебных заведений. Горный журнал*. 2003. № 3. С. 106–112.
20. Фомин К.В. Методика оценки спектральной плотности момента сопротивления на рабочем органе торфяного фрезерующего агрегата // *Записки Горного института*. 2020. Т. 241. С. 58–67.
21. Фомин К.В. Моделирование и анализ момента нагружения на рабочем органе торфяного фрезерующего агрегата // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2002. № 2. С. 222–226.

**Для цитирования:** Фомин К.В. Анализ влияния неточности расположения и размеров резцов на рабочем органе торфяного фрезерующего агрегата на частотные свойства момента сопротивления // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2021. № 4 (12). С. 46–56.

# ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF INACCURACY OF ARRANGEMENT AND HEIGHT OF CUTTERS ON THE WORKING BODY OF A PEAT MILLING MACHINE ON THE FREQUENCY PROPERTIES OF THE RESISTANCE TORQUE

K.V. FOMIN, Dr. Sc.

Tver State Technical University, 22, Af. Nikitin emb.,  
170026, Tver, Russian Federation, e-mail: fomin\_tver@mail.ru

In the article a model of the moment of resistance is offered which takes into account periodical character of interaction of cutters with a peat deposit, random conditions and modes of machine operation, influence of errors of blade angles on the cutter body and their height, connected with inaccuracy of manufacturing and assembly of an executive body as well as with wear or irreversible deformations of cutting elements. On its basis expressions for calculation of spectral density of the torque are received and influence of errors on its frequency properties is investigated. Deviation of geometrical parameters from the «ideal» values leads to appearance of additional components at frequencies multiple of the cutter angular velocity in the spectral momentum density. Their magnitude is proportional to the total error of blade placement by angle, as well as proportional to the total value of the ratio of blade height errors to feed rate. These factors should be taken into account when working with low feeds and working tools with a large number of cutting elements; when calculating dynamic loads in the elements of a structure if their natural frequencies are the same or close to the cutter angular velocity or multiple of it.

*Keywords:* peat milling unit, cutter, blade location error, cutter height error, resistance torque, load model, spectral density.

## REFERENCES

1. Misnikov O.S. Basic technologies and equipment used for peat deposit development in foreign countries. *E3S Web of Conferences*. – EDP Sciences. 2018. V. 41, pp. 01046.
2. Samsonov L.N. Frezerovaniye torfyanoy zalezhi [Peat Milling]. Moscow: Nedra, 1985. 211 p.
3. Kopenkin V.D., Kopenkina L.V., Samsonov L.N. The development of milling machines in peat production (analysis, prospects). *Gorniy Informatsionno-analiticheskiy byulleten*. 2003. No. 10, pp. 204–207. (In Russian).
4. Samsonov L.N., Fomin K.V. Elementy statisticheskoy dinamiki torfyanykh frezeruyushchikh agregatov [Elements of the statistical dynamics of peat milling units]. Tver: TSTU, 2005, 168 p.
5. Gorlov I.V., Rahutin M.G. Effect of the presence of stumps on no-failure performance of peat machines. *Gorniy Informatsionno-analiticheskiy byulleten (nauchno-tekhnicheskiy zhurnal)*. 2017. No. 12, pp. 139–145 (In Russian).
6. Mikhaylov A.V., Rodionov E.A., Zvonarev I.E. Analysis of conditions for vertical cutting of peat. *Gorniy informatsionno-analiticheskiy byulleten (nauchno-tekhnicheskiy zhurnal)*. 2019. No. 1, pp. 48–54. (In Russian).
7. Michailov A.V., Zhigul'skaya A.I., Garmaev O.M. An integrated approach to strip mining of peat. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 2019. V. 378:012087, pp. 24–27.

8. Gusev A.S. Veroyatnostnyye metody v mekhanike mashin i konstruktsiy. [Probabilistic Methods in Mechanics of Machines and Constructions]. Moscow: MGТУ im. N.E. Bauman, 2009. 224 p.
9. Levin B.R. Teoreticheskiye osnovy statisticheskoy radiotekhniki [Theoretical bases of statistical radio engineering]. Moscow: Radio i svjaz, 1989. 656 p.
10. Howard R.M. Principles of random signal analysis and low noise design: The power spectral density and its applications. Wiley, 2002. 310 p.
11. Lalanne C. Mechanical Vibration and Shock Analysis, Random Vibration (3rd Edition). John Wiley & Sons, Ltd, 2014. 595 p.
12. Svetlitsky V.A. Statistical dynamics and reliability theory for mechanical structures. Springer, Berlin/Heidelberg, 2003. 452 p.
13. Lutes L.D., Sarkani S. Random vibrations: analysis of structural and mechanical systems. Butterworth-Heinemann, 2004. 635 p.
14. Dokukin A.V., Krasnikov Ju.D., Hurgin Z.Ja. Statisticheskaya dinamika gornyx mashin [Statistical dynamics of mining machines]. Moscow: Mashinostroenie, 1978. 238 p.
15. Krasnikov Ju. D. Modelirovaniye razrusheniya ugley rezhushchimi instrumentami [Simulation of the destruction of coal by cutting tools]. Moscow: Nauka, 1981. 181 p.
16. Liu C.S., Li D.G., Chen X.P. Shearer Load Identification of the Load Spectrum of the Pick Based on Chaotic Characteristics. *Advanced Materials Research. – Trans Tech Publications Ltd.* 2011. V. 199, pp. 111–114.
17. Medolago A., Melzi S. A flexible multi-body model of a surface miner for analyzing the interaction between rock-cutting forces and chassis vibrations. *International Journal of Mining Science and Technology.* 2021. V. 31. No. 3, pp. 365–375.
18. Li X.H., Yu X.W., Ma X.H., Zhao Y.B. Simulation and Study of Random Loads on Continuous Miner Cutting Drum. *Advanced Materials Research. – Trans Tech Publications Ltd.* 2011. V. 308, pp. 1885–1888.
19. Samsonov L.N., Fomin K.V. Definition of probabilistic characteristics of the moment of loading on working body of the peat milling unit. *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Gornyj zhurnal.* 2003. No. 3, pp. 106–112. (In Russian).
20. Fomin K.V. Method for estimating the spectrum density of the resistance moment on the working body of a peat milling unit. *Zapiski Gornogo instituta.* 2020. V. 241, pp. 58–67. (In Russian).
21. Fomin K.V. Modeling and analysis of loading torque on the working body of the peat milling unit. *Gorniy Informatsionno-analitichesky byulleten.* 2000. V. 2, pp. 222–226. (In Russian).

Поступила в редакцию/received: 04.08.2021; после рецензирования/revised: 24.09.2021;  
принята/accepted: 30.09.2021

## КОМПЛЕКСНАЯ ДИАГНОСТИКА УЗЛОВ ТРЕНИЯ ТОРФЯНЫХ МАШИН

И.В. ГОРЛОВ, д-р техн. наук

Тверской государственный технический университет,  
170026, Тверь, наб. Аф. Никитина, д. 22, e-mail: gorloviv@yandex.ru

© Горлов И.В., 2021

В статье представлены результаты исследования технического состояния подшипников качения, которое проводилось на модели фрезерного агрегата. Установлено, что обеспечение требуемой надежности технологических машин невозможно без использования систем контроля состояния узлов трения. Для этого предложено в ответственные узлы торфяных машин устанавливать датчики температурного и виброакустического контроля, которые позволят на основе комплексного анализа состояния узлов трения машины выявлять на ранних стадиях и устранять причины отказов. Использование комплексного анализа параметров технического состояния основных узлов трения торфяных машин поможет на основе полученных данных с высокой точностью прогнозировать наработку до ремонта и предотвращать отказы в сезон добычи торфа.

*Ключевые слова:* узлы трения, торфяные машины, диагностика, надежность.

**DOI: 10.46573/2658-5030-2021-4-57-65**

### ВВЕДЕНИЕ

Одной из особенностей эксплуатации торфяных машин (ТМ) является сезонность их использования. Следовательно, недопустимо, чтобы трудоемкие отказы приводили к простоем машин в весенне-летний период. Конструкция основных узлов трения ТМ должна обеспечивать необходимую долговечность, износостойкость, доступную взаимозаменяемость деталей и иметь достаточно удобную сборку.

Большинство деталей ТМ и особенно их рабочие органы, а также гусеничные механизмы работают в тяжелых условиях и подвергаются статическим и динамическим нагрузкам, воздействию агрессивной окружающей среды. По статистическим данным эксплуатации ТМ известно, что с увеличением наработки затраты на текущий и аварийный ремонт машин значительно возрастают, а производительность, как следствие, снижается [1, 2]. Наступает момент, когда восстановление работоспособности машины становится экономически невыгодным, а дальнейшая эксплуатация ТМ может принести убытки [3]. Таким образом, при конструировании и модернизации ТМ нужно добиваться существенного увеличения ресурса узлов трения, что приведет к сокращению затрат на эксплуатацию. Диагностика состояния узлов трения ТМ позволит активно влиять на основные факторы, определяющие характер взаимодействия трущихся поверхностей, и это предотвратит их преждевременное разрушение. Отсутствие диагностики ответственных узлов ТМ может привести к трудоемким отказам в сезон добычи. Даже применение современных методов восстановления деталей [4] не всегда помогает быстро устранить неисправность.

Для обеспечения надежной и безопасной эксплуатации ТМ необходимо использовать системы комплексной диагностики состояния ответственных узлов. Такие

системы позволят следить за параметрами состояния контролируемых агрегатов и информировать специалистов об отклонениях от нормальных значений, что даст возможность своевременно принимать меры для предотвращения аварийных ситуаций.

### **СИСТЕМА КОМПЛЕКСНОЙ ДИАГНОСТИКИ**

Одними из наиболее ответственных узлов трения являются подшипниковые опоры ходовой части и технологических агрегатов. На сегодняшний день контроль над такими узлами практически отсутствует, в некоторых случаях используются системы автоматического слежения за температурой, например в железнодорожном транспорте. В подобных системах чаще всего предусмотрена возможность получения информации о температуре узла с помощью датчиков, встроенных в корпус буксы подшипников. Система контроля обеспечивает обработку полученной информации и сигнализирует об опасных нагревах подшипников. Используемые в настоящее время системы отслеживают только температуру узла и оповещают оператора о ее значениях, что не всегда позволяет проводить анализ развития повреждения подшипников и прогнозировать изменение их состояния. Для более глубокого анализа состояния подшипникового узла необходимо применять комплексную систему контроля температуры параллельно с виброакустическим анализом, а также использовать более совершенные аппаратные и вычислительные средства.

Применение виброакустического анализа дает возможность не только контролировать текущее состояние буксового узла, но и проводить анализ динамики изменения износа подшипников. Кроме того, модуль позволяет наблюдать за состоянием технологических агрегатов во время работы, что повышает надежность эксплуатации [5, 6].

Для осуществления виброакустического контроля необходимо применять специально разработанный аппаратный набор, включающий в себя комплект датчиков и вычислительный блок. Чтобы сократить затраты на эксплуатацию, эти аппаратные наборы можно устанавливать на новые ТМ или встраивать их в ответственные узлы во время реконструкции или капитального ремонта.

При разработке модуля, используемого на железнодорожном транспорте, были применены современные аппаратные и вычислительные средства, что позволило при относительно небольших затратах расширить возможности создаваемого аппаратного обеспечения. Кроме того, все датчики и вычислительный блок были выполнены в корпусах с небольшими габаритными размерами, и это дает возможность устанавливать разработанное оборудование в существующие узлы трения без значительных изменений конструкции.

Разработка и производство системы комплексного контроля состояния буксовых узлов для железнодорожных вагонов с применением температурного и виброакустического анализа осуществляется компанией ООО «КСК Элком» [7].

Разработанная система состоит из следующих функциональных подсистем:

- 1) датчики, устанавливаемые в буксовые узлы и кузов вагона;
- 2) центральный вычислительный блок, устанавливаемый в специально отведенном месте в вагоне;
- 3) кабельные линии связи датчиков с вагонами.

Для контроля состояния буксовых узлов применяются датчики с возможностью измерения температуры и виброакустического сигнала. Они включают в себя термочувствительный элемент, акселерометр и вычислительный модуль. Термочувствительный элемент располагается в теплопроводном колпачке корпуса датчика, а акселерометр и вычислительный модуль находятся в основном корпусе

датчика. Сам датчик устанавливается непосредственно в корпус буксового узла и жестко фиксируется.

Вычислительный модуль датчика производит периодический опрос датчика температуры и акселерометра при подаче питания. Измеряемая температура имеет выходной параметр в градусах Цельсия, а виброакустический сигнал формируется либо в дискретные значения амплитуды по времени, либо в спектральный состав сигнала. Вычислительный модуль выполнен на базе 32-битного ARM-микроконтроллера. Линия связи датчиков с центральным блоком однопроводная полудуплексная, скорость обмена – настраиваемая.

Центральный вычислительный блок включает в себя корпус из листовой стали, на передней панели которого расположены сенсорный жидкокристаллический экран, световая индикация и порт беспроводного электронного ключа. На боковых сторонах корпуса блока расположены питающие, сигнальные и интерфейсные разъемы. В корпус блока заключены электронные модули системы питания индикации и вычислительный модуль. Питание блока осуществляется от бортовой сети вагона. Для повышения надежности связь блока с датчиками осуществляется по четырем независимым линиям. Информация о состоянии буксовых узлов отображается на дисплее блока, а также дублируется дополнительной световой и звуковой сигнализацией. Блок имеет возможность связи с бортовой локальной вычислительной сетью вагона, что позволяет контролировать состояние буксовых узлов удаленно. Настройка и обновление программного обеспечения блока могут производиться непосредственно на блоке, через USB-интерфейс (с помощью компьютера) или через локальную вычислительную сеть удаленно. Для сохранения хронологии поступления данных с датчиков в блоке установлена энергонезависимая память в виде SD-карты.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Виброакустическая диагностика позволяет с высокой точностью определять техническое состояние исследуемого объекта и прогнозировать изменение его работоспособности [8, 9]. Исследование процесса изменения технического состояния подшипников фрезерного агрегата в зависимости от различных факторов воздействия было проведено на физической модели в масштабе 1:5 (рис. 1). Фрезерный барабан 1 физической модели агрегата устанавливался на шарнирную раму 2 с помощью буксового узла 3 с подшипником. Привод модели фрезы производился с помощью коллекторного электродвигателя 4 через муфту 5.

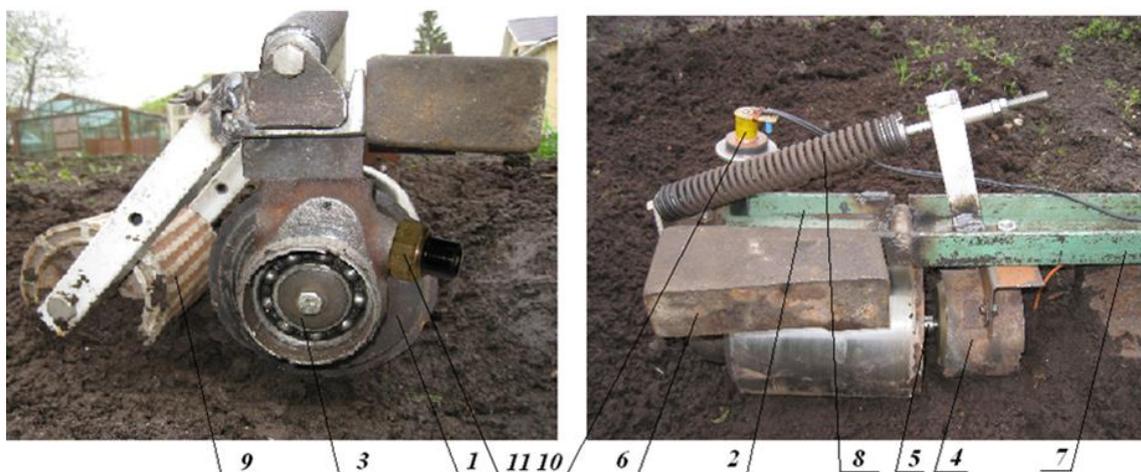


Рис. 1. Общий вид модели фрезерного агрегата

Чтобы выдержать соотношение масс элементов физической модели в соответствии с параметрами реального фрезерного агрегата, на шарнирную раму устанавливался дополнительный груз 6 (см. рис. 1). Шарнирная рама соединялась с центральной рамой 7 и поддерживалась витой пружиной 8, которая компенсировала вес шарнирной рамы с фрезой и опорным катком 9. Для измерения виброакустического сигнала использовался датчик 10 индукционного типа, для определения температуры применялся датчик 11. Датчики подключались через адаптеры к ноутбуку.

Испытания были разделены на три интервала. На первом исследовании проводились на представленной модели с использованием нового опорного подшипника. На рис. 2 представлена амплитудно-частотная характеристика виброакустического сигнала для нового подшипника качения модели фрезерного агрегата. Очевидно, что наибольшая амплитуда виброакустического сигнала наблюдается на частоте вращения фрезерного барабана, что свидетельствует о значительном его дисбалансе. Наблюдаются также пики на других частотах. Для определения источника сигнала можно использовать калькулятор частот виброакустических сигналов подшипников качения Замираева Константина Сергеевича.

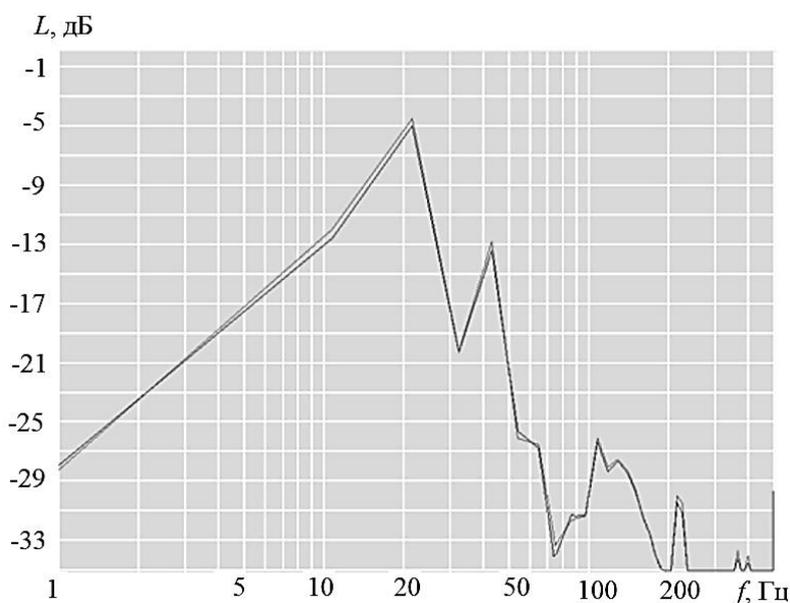


Рис. 2. Амплитудно-частотные характеристики виброакустического сигнала, полученные при испытаниях модели фрезерного агрегата с новым подшипником качения

У использованного для испытаний подшипника качения разброс диаметров шаров находится в пределах 3–5 мкм, следовательно, при его вращении возникают характерные вибрации на частоте 46 Гц (частота перекачивания шаров). Кроме того, наблюдается пик на частоте, соответствующей перекачиванию шаров по внутреннему кольцу.

На следующем этапе исследований были проведены испытания на модели фрезерного агрегата, у которого фрезерный барабан устанавливался на частично изношенный подшипник качения (выработавший приблизительно половину ресурса). Амплитуды виброакустического сигнала для соответствующих частот при этом значительно выросли (рис. 3). Из графиков видно, что амплитуда, которая

соответствует вращению корпуса фрезы, не изменилась, а увеличилась амплитуда колебаний на частоте вращения шаров и их перекатывания по внутреннему кольцу.

На третьем интервале исследования проводились испытания с изношенными подшипниками качения. По амплитудно-частотной характеристике виброакустического сигнала (рис. 4) видно, что практически по всем характерным частотам подшипника наблюдается значительное увеличение амплитуды колебаний. Это показывает, что подшипник качения находится в предельном состоянии, т.е. требуется его срочная замена.

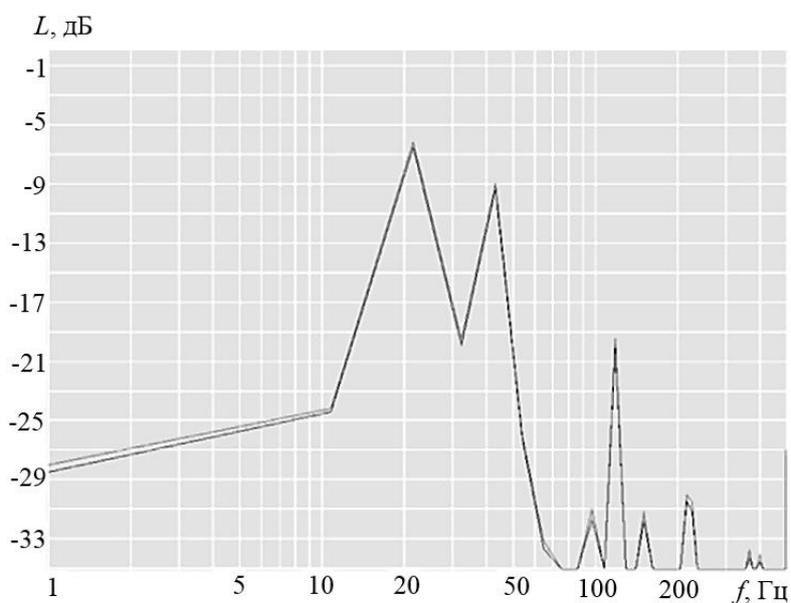


Рис. 3. Амплитудно-частотные характеристики виброакустического сигнала, полученные при испытаниях модели фрезерного агрегата с частично изношенным подшипником качения

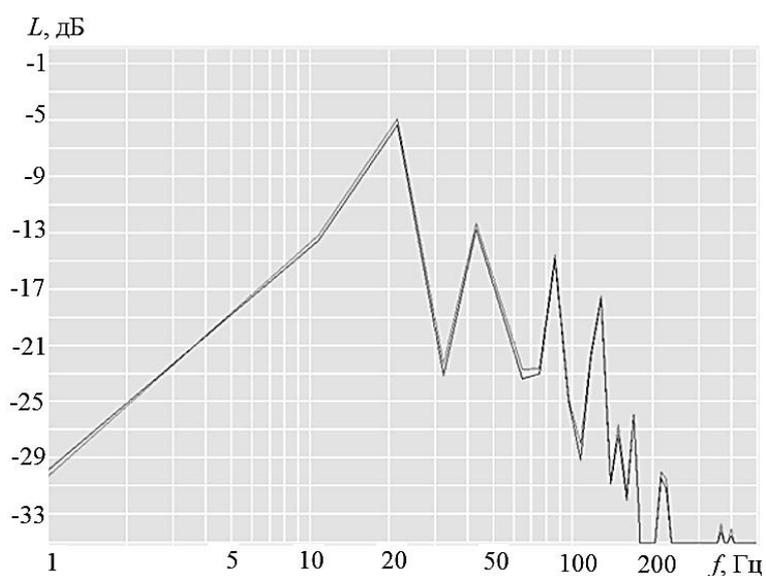


Рис. 4. Амплитудно-частотные характеристики виброакустического сигнала, полученные при испытаниях модели фрезерного агрегата с изношенным подшипником качения

Исследования модели фрезерного агрегата на втором и третьем этапах показали, что при увеличении износа подшипника возрастают амплитуды колебаний для всех характерных частот, а также наблюдается повышение общего уровня виброакустического сигнала, который тоже можно использовать для предварительной диагностики подшипников агрегата.

Кроме того, параллельно с виброакустическим исследованием проводились измерения температуры узлов трения. Температурный показатель дает дополнительную информацию о состоянии узла трения и перспективах его использования. Повышение температуры подшипника качения может свидетельствовать не только о его износе, но и о возможной перегрузке узла, отсутствии или ухудшении качества смазки, наличии загрязнений и др. На рис. 5 показаны графики изменения температуры подшипников качения в зависимости от наработки (получены на модели фрезерного агрегата).

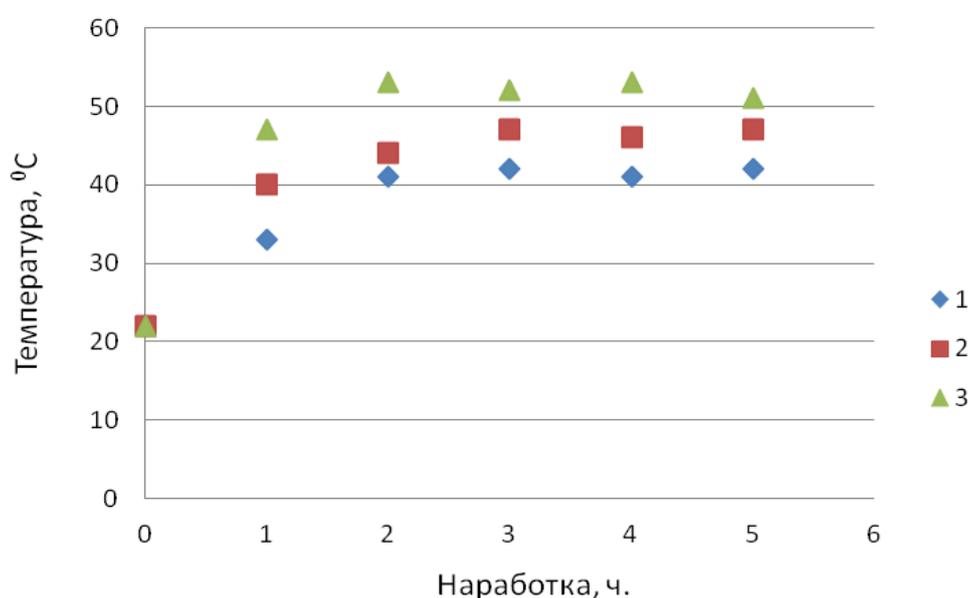


Рис. 5. Изменение температуры подшипников качения:  
1 – новый подшипник;  
2 – частично изношенный; 3 – изношенный

При наработке около 3 ч температура исследуемого узла стабилизируется. Кроме того, из графиков видно, что наиболее интенсивное повышение температуры наблюдается у изношенных подшипников, а температура узла стабилизируется на более высоком уровне.

При проведении исследований на основе данных об изменении контролируемой величины можно рассчитать коэффициент  $\alpha$ , характеризующий степень интенсивности изменения диагностируемого параметра в зависимости от наработки:

$$\alpha_i = \frac{\ln(\Delta X_{i+1} / \Delta X_i)}{\ln(t_{i+1} / t_i)},$$

где  $\Delta X_i$  и  $\Delta X_{i+1}$  – изменение виброакустического сигнала или температуры при наработке  $t_i$  и  $t_{i+1}$ .

Помимо этого, можно рассчитать остаточный ресурс опорного подшипника

$$t_{ост} = \frac{\Delta t(X_{ПП}^{1/\alpha} - \Delta X_i^{1/\alpha})}{\Delta X_i^{1/\alpha} - \Delta X_{i-1}^{1/\alpha}}$$

и коэффициент динамики изменения диагностируемого параметра

$$K_{ci}^{1/\alpha} = \frac{\Delta X_i^{1/\alpha} - \Delta X_{i-1}^{1/\alpha}}{\Delta t}.$$

### АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

При высокой динамике изменения диагностируемого параметра подшипников качения  $K_{ci}$  прогнозировать остаточный ресурс сложно. В этом случае требуется замена подшипников.

При периодическом диагностировании фрезерного агрегата можно с достаточной точностью выявить интервал времени, когда подшипники переходят в зону интенсивного износа, в которой отказ трудно прогнозировать, и требуется замена узла, даже если не достигнуто предельное состояние по наработке.

Наиболее значимым фактором, влияющим на износ подшипника, является дисбаланс фрезы, который приводит к существенному увеличению нагрузки на подшипниковые опоры. Следовательно, перед началом использования фрезерного агрегата нужно проводить его диагностику и по ее итогам либо принимать взвешенное решение о передаче в эксплуатацию, либо предпринимать действия для устранения дисбаланса фрезы. После проведения необходимых мероприятий требуется повторное диагностирование с сохранением исходной амплитудно-частотной характеристики. Относительно нее в последующем будет проверяться изменение контролируемых параметров и рассчитываться остаточный ресурс элементов агрегата. Температурный контроль трибоузлов позволит получать дополнительную информацию о текущем состоянии подшипников качения в зависимости от внутренних и внешних параметров эксплуатации. Например, повышение температуры подшипника может быть связано не только с его износом, но и с недостатком смазки, ее загрязнением или изменением пластических свойств. Таким образом, для уточнения прогнозирования изменения технического состояния и определения мер воздействия на узел трения потребуются дополнительный анализ виброакустического сигнала.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диагностика и последующий анализ контролируемых параметров позволяют быстро определять текущее состояние основных узлов ТМ без эвакуации машины с торфяной залежи, что существенно уменьшает потери из-за простоев в неплановых ремонтах и помогает с достаточно высокой точностью определять остаточный ресурс основных элементов технологических машин.

Использование систем комплексного контроля и анализа состояния трибоузлов ТМ позволит в режиме реального времени получать всю необходимую информацию о состоянии наиболее ответственных узлов и проводить углубленный анализ изменения их эксплуатационных параметров [10, 11]. Это не только обеспечит контроль за текущим состоянием, но и приведет к тому, что можно будет достаточно точно прогнозировать наработку основных элементов конструкции до технического

обслуживания и ремонта и предотвращать аварийные ситуации при эксплуатации машин в сезон добычи торфа.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Михайлов А.В., Иванов С.Л., Бондарев Ю.Ю. Состояние технического перевооружения машинно-тракторного парка торфодобывающих компаний // *Научно-технические ведомости СПбГПУ*. 2014. № 3 (202). С. 229–235.
2. Михайлов А.В., Иванов С.Л., Габов В.В. Формирование и эффективное использование машинного парка торфодобывающих компаний // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело*. 2015. № 14. С. 82–91.
3. Alhuraish I., Robledo C., Kobi A. Assessment of lean manufacturing and six sigma operation with decision making based on the analytic hierarchy process // *IFAC-PapersOnLine*. 2016. V. 49. № 12. P. 59–64.
4. Болотов А.Н., Горлов И.В., Рахутин М.Г. Новый способ восстановления изношенных поверхностей методом пластического деформирования // *Вестник машиностроения*. 2018. № 9. С. 67–72.
5. Гаврилин А.Н., Мойзес Б.Б. Диагностика технологических систем: учебное пособие. Ч. 2. Томск: Томский политехнический университет, 2014. 128 с.
6. Скрыпников А.В., Кондрашова Е.В., Бурмистрова О.Н., Яковлев К.А. Комплексная оценка надежности лесозаготовительных машин // *Современные проблемы науки и образования*. 2013. № 2. URL: <http://science-education.ru/ru/article/view?id=8537> (дата обращения: 20.09.2021).
7. Горлов А.И., Болотов А.Н., Горлов И.В. Система мониторинга трибоузлов // *Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел и деталей технологического и энергетического оборудования: межвузовский сборник научных трудов*. Тверь: ТвГТУ, 2016. С. 121–127.
8. Вибрационная диагностика. URL: <http://vibro-expert.ru/granichnie-znacheniya-chastotnix-polos-tretoktavnogospetra.html> (дата обращения: 20.09.2021).
9. Bearing Failure Analysis. URL: [http://web.applied.com/site.cfm/Bearing\\_Failure\\_Analysis\\_Operating\\_Conditions\\_Typically\\_Hold\\_Key.cfm](http://web.applied.com/site.cfm/Bearing_Failure_Analysis_Operating_Conditions_Typically_Hold_Key.cfm) (дата обращения: 23.09.2021).
10. Болотов А.Н., Горлов И.В., Полетаева Е.В., Рахутин М.Г. Информационная система анализа эксплуатации технологических машин // *Программные продукты и системы*. 2016. № 1. С. 83–89.
11. Шиловский В.Н., Питухин А.В., Костюкевич В.М. Исследование потока отказов элементов конструкций лесных машин // *Современные наукоемкие технологии*. 2016. № 7-1. С. 94–98.

**Для цитирования:** Горлов И.В. Комплексная диагностика узлов трения торфяных машин // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2021. № 4 (12). С. 57–65.

#### COMPREHENSIVE DIAGNOSTICS OF FRICTION UNITS OF PEAT MACHINES

I.V. GORLOV, Dr. Sc.

Tver State Technical University, 22, Af. Nikitin emb., 170026, Tver,  
Russian Federation, e-mail: gorloviv@yandex.ru

The article presents the results of a study of the technical condition of rolling bearings,

*Вестник Тверского государственного технического университета.  
Серия «Технические науки». № 4 (12), 2021*

the studies were carried out on a model of a milling unit. Ensuring the required reliability of technological machines is impossible without the use of systems for monitoring the state of friction units. For this, it is proposed to install sensors for temperature and vibroacoustic control in critical units of peat machines, which will allow, based on a comprehensive analysis of the state of friction units of the machine, to identify at early stages and eliminate the causes of failures. The use of a comprehensive analysis of the parameters of the technical state of the main friction units of peat machines allows, on the basis of the data obtained, to predict with high accuracy the operating time before repair, preventing failures during the peat mining season.

*Keywords:* friction units, peat machines, diagnostics, reliability.

## REFERENCES

1. Mikhaylov A.V., Ivanov S.L., Bondarev Yu.Yu. The state of technical re-equipment of the machine and tractor fleet of peat mining companies. *Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbGPU*. 2014. No. 3 (202), pp. 229–235. (In Russian).
2. Mikhaylov A.V., Ivanov S.L., Gabov V.V. Formation and efficient use of the machine park of peat mining companies. *Vestnik Permskogo natsionalnogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Geologiya. Neftgazovoye i gornoye delo*. 2015. No. 14, pp. 82–91. (In Russian)
3. Alhuraish I., Robledo C., Kobi A. Assessment of lean manufacturing and six sigma operation with decision making based on the analytic hierarchy process. *IFAC-PapersOnLine*. 2016. V. 49. No. 12, pp. 59–64.
4. Bolotov A.N., Gorlov I.V., Rahutin M.G. A new way to restore worn surfaces by plastic deformation. *Vestnik mashinostroeniya*. 2018. No. 9, pp. 67–72. (In Russian).
5. Gavrilin A.N., Mojzes B.B. Diagnostika tekhnologicheskikh sistem: uchebnoye posobiye. Chast 2 [Diagnostics of technological systems: a tutorial. Part 2]. Tomsk: Tomskiy politekhnicheskii universitet, 2014. 128 p.
6. Skrypnikov A.V., Kondrashova E.V., Burmistrova O.N., Yakovlev K.A. Comprehensive assessment of the reliability of forestry machines. *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya*. 2013. No. 2. URL: <http://science-education.ru/ru/article/view?id=8537> (date accessed: 20.09.2021).
7. Gorlov A.I., Bolotov A.N., Gorlov I.V. Tribodes monitoring system. *Mechanics and physics of processes on the surface and in contact with solids and parts of technological and power equipment: interuniversity collection of scientific papers*. Tver: TvGTU. 2016, pp. 121–127. (In Russian).
8. Vibration Diagnostics. URL: <http://vibro-expert.ru/granichnie-znacheniya-chastotnix-polos-tretoktavnogospektra.html> (date accessed: 20.09.2021).
9. Bearing Failure Analysis. URL: [http://web.applied.com/site.cfm/Bearing\\_Failure\\_Analysis\\_Operating\\_Conditions\\_Typically\\_Hold\\_Key.cfm](http://web.applied.com/site.cfm/Bearing_Failure_Analysis_Operating_Conditions_Typically_Hold_Key.cfm) (date accessed: 23.09.2021).
10. Bolotov A.N., Gorlov I.V., Poletaeva E.V., Rahutin M.G. Information system for analyzing the operation of technological machines. *Programmnyye produkty i sistemy*. 2016. No. 1, pp. 83–89. (In Russian).
11. Shilovskij V.N., Pituhin A.V., Kostyukevich V.M. Investigation of the failure flow of structural elements of forest machines. *Sovremennyye naukoemkie tekhnologii*. 2016. No. 7-1, pp. 94–98. (In Russian).

Поступила в редакцию/received: 06.09.2021; после рецензирования/revised: 27.09.2021;  
принята/accepted: 30.09.2021

# ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 681.5.011

## МЕХАНИЗМ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ В СИСТЕМАХ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Г.Б. БУРДО, д-р техн. наук, А.Н. БОЛОТОВ, д-р техн. наук

Тверской государственной технической университет, 170026, Тверь,  
наб. Аф. Никитина, д. 22, e-mail: gbtms@yandex.ru

© Бурдо Г.Б., Болотов А.Н., 2021

В статье приведены результаты исследования, посвященного описанию способа представления знаний в автоматизированных системах проектирования и управления технологическими процессами для единичного и мелкосерийного производств. Знания предлагается представлять в виде трех типов функций, характерных для человеческого мышления. Показано формирование новых знаний на основе предыдущего опыта.

*Ключевые слова:* технологический процесс, автоматизированное проектирование, искусственный интеллект, описание знаний.

**DOI: 10.46573/2658-5030-2021-4-66-75**

### ВВЕДЕНИЕ

Машиностроительные системы автоматизированного проектирования (САПР, или CAD), относящиеся к областям проектирования и конструирования изделий и разработки технологических процессов (автоматизированная система технологической подготовки (АСТПП, или САМ)), в настоящее время находят все более широкое применение. Это обуславливается необходимостью проведения конструкторской и технологической подготовки в кратчайшие сроки с целью своевременного удовлетворения заявок потребителей наукоемкой продукции и вывода последней на рынок.

Известно, что одним из важнейших требований, обеспечивающим эффективность функционирования САПР и АСТПП, является наличие элементов искусственного интеллекта (ИИ) в процедурах синтеза решений. Наиболее важная черта интеллектуальных систем, относящихся к указанным выше областям, – использование механизма обучения. Такой подход позволяет продлить жизненный цикл автоматизированной системы без ущерба для качества синтезируемых решений, сделать САПР и АСТПП в какой-то мере инвариантными к объектам проектирования, сократить период верификации и валидации. Наличие элементов ИИ во многом определяется способами преобразования информации, заложенными в алгоритмах функционирования систем, т.е., в сущности говоря, формой представления знаний. Эти факты и определили цель настоящей работы.

## ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

В наиболее общем виде информационную суть любых моделей знаний в САПР (логических, продукционных, сетевых, табличных, аналитических зависимостей, интуиции проектировщика (пользователя системы) [1–4]) можно представить как информационное преобразование проектируемого объекта (ПО) (изделия, технологического процесса) из одного информационного состояния в другое с помощью операторов, определенных как проектные функции  $R$ . Проектные функции обеспечивают преобразование ПО из одного информационного состояния ( $C_i$ ) в другое ( $C_j$ ) [3]. Следовательно,

$$R = C_i \rightarrow C_j. \quad (1)$$

Каждое информационное состояние ПО трактуется широко (с точки зрения системного подхода). В системном аспекте ПО в качестве составляющих включает такие понятия, как «структура», «отношение», «состояние», «связь», «элемент», «функция» и т.д. Как техническая система информационное состояние ПО определяется [5, 6] пятью характеристиками:

$$ПО = \langle H, F, S, Z, U \rangle, \quad (2)$$

где  $H$  – связи ПО с внешней средой;  $F$  – набор выполняемых ПО функций;  $S$  – структура ПО;  $Z$  – совокупность функциональных и структурных свойств ПО, определяемая составом его элементов;  $U$  – история развития ПО, включающая изменение его информационных преобразований.

Если исходить из принципа наследования системных свойств, то проектирующие системы (САПР, АСТПП) должны наследовать и историю ПО с той разницей, что их история – история изменения (развития) проектной функции – оператора  $R$ . А это не что иное, как обучение (или накопление и обобщение опыта).

## ИНФОРМАЦИОННЫЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ В СИСТЕМАХ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Процессы проектирования в САПР и АСТПП (как решающих системах) имеют специфический характер, который определяется сложностью и развитием объектов проектирования, взаимным влиянием ПО и изменяющейся областью их применения.

Процесс проектирования в АСТПП должен заключаться в преобразовании по определенным правилам исходной информации, имеющейся в задании на проектирование (конструкторской информации, базовой и нормативной информации), в информацию, определяющую содержание технологического процесса.

Процесс проектирования в САПР заключается в переработке по определенным алгоритмам исходной информации (технического задания на проектирование изделия) в информацию, определяющую геометрические и информационные модели изделия [3].

Таким образом, разработка САПР и АСТПП, связанная с моделированием процессов проектирования в указанных системах, сопряжена с задачами:

1) установления механизмов принятия решений на различных уровнях процесса проектирования (механизм А);

2) поддержания соответствия принимаемых решений реальным условиям эксплуатации (использования) проектируемых объектов в течение длительного периода времени путем видоизменения правил принятия решений на основе накопленного знания (механизм Б).

Процесс проектирования в указанных системах характеризуется пятью основными функционально-смысловыми типами преобразования информации:

1. Собственно проектные процессы, когда производится многоуровневый синтез оригинальных технологических процессов или моделей изделия.

2. Информационно-поисковые процессы, в ходе которых выбираются решения на основе типовых рекомендаций.

3. Обслуживающие процессы (ввод и детализация входной информации, обмен информацией, оформление и печать выходной информации, процедуры диалога с оператором-проектировщиком).

4. Процессы обучения пользователя системы, заключающиеся в корректировке его знаний о содержании процессов первых трех типов.

5. Процессы обучения и самообучения решающей системы, т.е. перестройка и видоизменение проектных процедур, знаний о ПС, охватывающие первые три типа преобразования [3].

Суть процессов 1, 2 и 3-го типов, характеризующую проектирование на низших уровнях декомпозиции, без учета их динамики можно представить как

$$q = f(S), \quad (3)$$

где  $q$  – результат решения (целевое состояние);  $S$  – задание на проектирование (начальное состояние).

### ПРОЕКТНАЯ ФУНКЦИЯ

Практическую значимость имеет представление процесса проектирования как совокупности взаимосвязанных информационных структур преобразования информации посредством проектной функции  $R$ . При этом должно обеспечиваться сохранение семантического содержания информационных структур решаемой задачи на всех уровнях декомпозиции и проектируемого объекта. Статическая часть  $R$  (формализованные правила проектирования) может описываться предикатными и аналитическими зависимостями, табличными и прочими моделями, графами.

Модификацию проектной функции  $R$  определяют составляющие:

1. Методы оптимизации решений, позволяющие на различных уровнях декомпозиции выбрать решение, близкое к оптимальному. При изменении области возможных решений, целевой функции оптимум, естественно, будет смещен.

2. Интуитивные знания, имеющиеся у проектировщиков и экспертов и реализуемые при взаимодействии с автоматизированной системой. Это, как правило, часть знания, трудно формализуемая или неформализованная к настоящему времени с требуемой детализацией и точностью. Она проявляется в избирательности решения и экспертной оценке вариантов [3].

3. Модели накопления знаний и корректировки процесса проектирования, имеющиеся в АСТПП и САПР.

Наличие данных элементов способствует обучению автоматизированных систем. Это позволит говорить о том, что им будут свойственны элементы ИИ, т.е. будет реализован механизм Б.

Таким образом, проектная функция  $R$  будет состоять из двух наборов элементов: множества правил преобразования информации  $R_F$  (механизм А) и множества функций накопления и корректировки знаний  $R_M$  (механизм Б):

$$R = \{R_F, R_M\}. \quad (4)$$

К настоящему времени в теории моделирования процессов проектирования отсутствует конкретное представление взаимодействия элементов функции вида  $R_F$ .

Тем не менее, анализируя методы переработки информации в САПР и АСТПП, следует заключить, что процесс синтеза решения должен включать аналитические и оптимизационные, логические и интуитивные составляющие. Тогда функция преобразования  $R_F$  представляется состоящей из подфункций трех видов:

$$R_F = \{LF, OF, IF\}, \quad (5)$$

где  $LF, OF, IF$  – множества логических, оптимизационных и интуитивных функций, представляющих собой объединение частных функций:

$$LF = \bigcup^n LF_i; OF = \bigcup^l OF_i; IF = \bigcup^m IF_i, \quad (6)$$

где  $n, l, m$  – число частных функций.

Логические функции  $LF$ , включающие качественные и количественные решения, характеризуются статистико-вероятностными связями частных значений результатов и аргументов решения, причем связь в настоящий момент времени однозначно и полностью определена. Логические функции формируются на основе опыта проектирования технических объектов. С помощью  $LF$  могут быть формализованы типовые решения по технологии, структурированы временные затраты на выполнение операций, данные по оборудованию и инструменту вместе с алгоритмами выбора, типовые решения по конструктивным элементам различных изделий и т.п. Функции могут представляться в автоматизированных системах в виде табличных, сетевых и перестановочных моделей [3].

Таким образом, сущность  $x$ -й  $LF$  записывается как

$$\begin{cases} q_i = \rho_i(\bigcup^l a_{kj}); \bigcup^n \rho_i = fx \equiv LF_x; \bigcup^m q_i = g_x \equiv G_x; \\ \bigcup^l a_{kj} = A_K; \bigcup^p A_K = S_x, \end{cases} \quad (7)$$

где  $fx \equiv LF_x$  – дискретное множество информационных преобразований (логическая функция) конкретной области применения;  $\rho_i$  – частный оператор  $LF_x$  (решающее правило);  $G_x$  – область существования результатов решения  $LF_x$ ;  $q_i$  – частный результат решения для решающего правила  $\rho_i$ ;  $a_{kj}$  – частное значение  $k$ -го аргумента;  $A_k$  – область существования значений  $k$ -го аргумента;  $S_x$  – совокупность аргументов, влияющих на решения в области  $G_x$ .

Дискретность  $LF$  определяется дискретностью аргументов и значений результатов решения, а определенность – однозначностью множеств триад  $q_i, \rho_i, \bigcup a_{kj}$ . Однако  $LF$  являются ограниченными вследствие ограниченности  $G_x$  и  $S_x$ . Их примерами могут служить процедуры задания планов обработки поверхностей и выбора элементов времен в АСТПП. Логические функции, на первый взгляд, имеют некое подобие аксиом, однако важнейшее отличие заключается в том, что они более подвижны, изменяемы и могут модифицироваться в течение жизненного цикла решающей системы. В каждый конкретный момент времени они могут использоваться и как аксиомы [3].

Оптимизационные функции  $OF$  учитывают выявленные количественные зависимости результатов решения от значений определенных аргументов с обеспечением экстремума характеристик  $g_i$ :

$$\left\{ \begin{array}{l} g_i = \phi_{yi}(\bigcup^n a_{kj}, \bigcup^m C_{kj}); \bigcup^l \phi_{ki} = OF_y \equiv f_y; \bigcup^m C_{kj} = C_k; \\ \left\{ \begin{array}{l} \bigcup g_i \\ g_{\min} \leq g_i \leq g_{\max} \end{array} \right\} = G_y; ((\bigcup^q A_{ki}) \cup (\bigcup^p C_{ki})) = S_y, \end{array} \right. \quad (8)$$

где  $OF_y \equiv f_y$  – определенная  $OF$  конкретной области применения;  $\phi_{yi}$  – аналитический оператор;  $G_y$  – область существования результатов решения функции  $OF_y$ ;  $g_i$  – частное значение результата решения;  $S_y$  – аргументы, влияющие на выбор решения в пределах  $G_y$ ;  $\bigcup^q A_{ki} = A_k$  – неуправляемые аргументы, не зависящие от  $OF_y$ ;  $A_k$  – область существования  $k$ -го аргумента;  $a_{kj}$  – частное значение  $k$ -го аргумента;  $\bigcup^p C_{ki}$  – аргументы, оптимизирующие значения результатов решения (управляемые аргументы);  $C_k$  – область существования  $k$ -го управляемого аргумента;  $C_{ki}$  – частное значение  $k$ -го управляемого аргумента;

$$C_k = \bigcup^p C_{ki} = \varphi_{k1} \left( \bigcup^q A_{ki}, E \right); E = \varphi_{k2}(g_i), \quad (9)$$

где  $E$  – ожидаемая эффективность результатов решения.

Оптимизационная функция непрерывна вследствие непрерывности аргументов, однако результаты решения могут быть как непрерывными, так и дискретными. Для  $OF$  также характерны определенность и ограниченность.

Примерами подобных функций с дискретным значением области существования  $G$  могут служить зависимость, определяющая оптимальную последовательность обработки поверхностей в операции (АСТПП), передаточные отношения между звеньями узлов изделия (САПР). Примером  $OF$  с непрерывным значением результатов может быть случай определения оптимальных режимов резания в АСТПП по заданной целевой функции.

Интуитивные функции  $IF$ , отражающие субъективные знания разработчиков решающих систем или знания оператора-пользователя системы (в режиме диалога), включают неформализованные (неявные) интуитивные решения или триады:

$$\left\{ \begin{array}{l} g_i = \varphi_{zi} \left( \bigcup^l a_{kj}, \bigcup^\infty x_j \right); \bigcup^\infty \varphi_{zi} = IF_z \equiv f_z; \\ \left\{ \begin{array}{l} \bigcup^l a_{kj} \\ a_{\min} \leq a_{kj} \leq a_{\max} \end{array} \right\} = A_k; \bigcup^m A_k = S_{zЯ}; \\ \left\{ \begin{array}{l} \bigcup^\infty x_{kj} \\ x_{\min} \leq x_{kj} \leq x_{\max} \end{array} \right\} = X_k; \bigcup^p X_{kj} = S_{zH}; S_z = S_{zЯ} \cup S_{zH}; \bigcup^m g_i = G_z, \end{array} \right. \quad (10)$$

где  $g_i$  – частный результат решения, принадлежащий области  $G_z$ ;  $G_z$  – область существования результатов решения;  $IF_z$  – интуитивная функция определенной, но явно не ограниченной области применения;  $S_{zЯ}$ ,  $S_{zH}$  – множества явных и неявных (неформализуемых) аргументов;  $S_z$  – их общее множество (объединение);  $A_k$  – область существования явного  $k$ -го аргумента;  $a_{kj}$  – его частное значение;  $x_k$  – явно не

определенная область существования неявного  $k$ -го аргумента;  $x_{kj}$  – его частное значение [3].

Характер решающего правила  $\varphi_{zi}$  не может быть предварительно определен вследствие его неоднозначности из-за наличия неявных аргументов. По мере накопления опыта проектирования уровень неформального описания  $\varphi_{zi}$  снижается вследствие уменьшения числа неявных аргументов.

Соотношение  $LF, OF, IF$  в функции преобразования  $R_F$  различно для каждого конкретного процесса проектирования, но общая закономерность состоит в том, что оно определяется уровнем типизации процесса проектирования, динамикой производственной системы, динамикой жизненного цикла решающей системы и степенью формальности знаний, отражающих исследованность объекта проектирования. При достаточной динамичности областей возможных решений и отсутствии формализованных знаний о проектируемом объекте функция  $R_F$  будет состоять из элементов всех трех типов.

### МЕХАНИЗМ ОБУЧЕНИЯ В АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМАХ

Степень реализации механизмов обучения характеризуется динамикой множества правил преобразования информации ( $R_F$ ). Динамика  $R_F$  состоит в следующем.

При отсутствии типовых решений в процессе проектирования участвуют  $OF$  и  $IF$ . Этот случай соответствует тем областям процесса проектирования, где отсутствует значительный положительный практический опыт, т.е. случаю проектирования новых объектов (технологии или изделия). Механизм (алгоритм) обучения автоматизированной системы при этом может быть представлен следующим образом: 1) выявляются оптимальные значения  $g_i$  из известных областей  $G_y$  при использовании  $OF_y$  для определенных значений аргументов; 2) выявляются новые значения  $g_i$  из областей  $G_z$ , некоторые неявные аргументы  $\bigcup X_{ky}$  и решающие правила получения вариантов для них ( $IF$ ). Таким образом, выявляются новые триады решений, при этом появляются новые знания как об объекте проектирования, так и об аргументах, определяющих его состояние. Это позволит синтезировать и новые правила информационного преобразования пространства поиска решений. Следовательно, можно говорить о работе механизма накопления и корректировке знаний  $R_M$ .

При неоднократном практическом подтверждении решений пополняются, помимо интуитивного знания, множества  $G_x, P_i, S_x$ , т.е. формируются новые  $LF$  при накоплении опыта информационного проектирования объекта:

$$R_M : \Delta \left( \bigcup^k LF \right) = F_1 \left( \bigcup^m OF_i, \bigcup^m IF_i \right), \quad (11)$$

где  $\Delta \left( \bigcup^k LF \right)$  – приращение, накопление знаний, охватывающих типовые проектные решения.

Процедуры (10) и (11) описывают процессы первого типа преобразований информации. Для статичных объектов проектирования необходимость в  $OF$  и  $IF$  после некоторого временного интервала функционирования отпадает, как и необходимость в корректировке  $G_x, P_i, S_x$ . В этом случае процедура поиска решения ограничивается  $LF$ :

$$R_F = F_2 \left( \bigcup^k LF_i \right). \quad (12)$$

Выражение (12) описывает вид проектной функции для второго типа преобразования информации, т.е. информационно-поисковые процессы, к которым сводится процесс проектирования. Процессы, имеющие не семантическое, а общеинформационное содержание, относятся к 3-му типу. Структура и функция процессов 4-го и 5-го типов принципиально одинаковые – разница в том, что в первом случае мы говорим о накоплении интуитивных знаний у оператора, а во втором – новых знаний в решающей системе. Если учитывать, что в процессе проектирования участвуют оба элемента, то при укрупненном представлении мы их можем не разделять. Таким образом, процессы 4-го и 5-го типов, описываемые  $R_M$ , представляют собой правила накопления знаний:

$$R_M : R_F^2 = F_3 \left( \bigcup^n IF, \bigcup^m OF \right); R_{FN} = F_4 (R_F, R_F^2), \quad (13)$$

где  $R_F^2$  – функция преобразования 2-го вида;  $R_{FN}$  – новое содержание функции преобразования.

Функция преобразования 2-го вида – достоверное проектное решение, выявленное неоднократной практической проверкой интуитивных решений и решений, полученных с помощью  $OF$ .  $R_{FN}$  отличается от  $R_F^2$  тем, что в ней обобщены закономерности процесса проектирования, описываемые не только с помощью  $R_F$  (ранее имеющихся знаний), но и с использованием  $R_F^2$ . Тогда

$$R_{FH} = \left( \left( \bigcup^k LF_i \right)_N \cup \left( \bigcup^m OF_i \right)_N \cup \left( \bigcup^n IF_i \right)_N \right), \quad (14)$$

причем

$$\left( \bigcup^k LF \right)_N = \left( \bigcup^x LF_i \right) \cup \Delta \left( \bigcup^x LF_i \right); \left( \bigcup^m OF \right)_N = \left( \bigcup^y OF_i \right) \cup \Delta \left( \bigcup^y OF_i \right); \quad (15)$$

$$\left( \bigcup^n IF \right)_N = \left( \bigcup^z IF_i \right) \cup \Delta \left( \bigcup^z IF_i \right), \quad (16)$$

где  $\Delta \left( \bigcup^x LF_i \right), \Delta \left( \bigcup^y OF_i \right), \Delta \left( \bigcup^z IF_i \right)$  – изменения составляющих  $R_F$ .

Из выражений (11) и (13) логически следует

$$R_M : \Delta \left( \bigcup^y OF_i \right) = F_5 \left( \bigcup^n IF_i \right) \text{ и } R_M : \Delta \left( \bigcup^z IF_i \right) = F_6 \left( \bigcup^n IF_i \right). \quad (17)$$

Таким образом, можно сделать вывод о том, что процессы 1-го типа с участием  $LF, OF, IF$  являются наиболее общими в механизме А (см. формулы (5), (6), (10)), определяя основу оператора  $R_F$ . Механизм Б описывается формулами (11), (13)–(17), отображающими функцию накопления и корректировки знаний  $R_M$ .

Модель проектной функции  $R = \{R_F, R_M\}$  позволяет учесть в каждом конкретном состоянии  $S = \cup A_k$  динамику развития факторов, установленных на момент разработки модели процесса проектирования, и тех, которые будут выявляться при осуществлении процесса проектирования за период его жизненного цикла.

При моделировании  $OF$  и  $IF$  используются процедуры (17). Методом экспертных оценок может быть обеспечена их рациональная компоновка в функции преобразования  $R_F$ . Формализация  $LF$  по зависимости (11) выполняется с обоснованным ограничением составляющих ее элементов [3, 7].

Надо представлять, что предлагаемый подход может быть достаточно эффективно реализован в рамках автоматизированных систем поддержки жизненного цикла изделия. Для накопления опыта проектирования и конструирования САПР (этап жизненного цикла – проектирование) должна иметь информационное взаимодействие с автоматизированными системами на этапах изготовления изделия, его испытания и эксплуатации (практический опыт изготовления, испытаний и эксплуатации). Точно так же для накопления опыта проектирования технологических процессов АСТПП должна быть информационно интегрирована в системы на этапе изготовления изделия (опыт реализации технологических процессов).

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Элементы показанного подхода были реализованы при создании моделей процесса проектирования в АСТПП, информационно интегрированной в автоматизированную систему управления технологическими процессами.

Методика состояла в следующем:

1. Детали, для которых разрабатывались технологические процессы, разбивались на типы по принципу конструкторской общности – общности конструкторской структуры детали (совокупности элементов детали и геометрических связей между ними).

2. В пределах каждого типа детали разбивались на размерные группы (исходя из размеров поверхностей, определяющих тип детали (для валов это диапазоны длин и диаметров ступеней)).

3. Разрабатывались и опробовались в производстве технологические процессы.

4. При положительном опыте внедрения анализировались технологические процессы, разработанные для деталей одной и той же размерной группы.

5. Выявлялись технологические процессы, имеющие (по оценкам экспертов) принципиально схожую структуру (последовательность и основное содержание операций технологических процессов – маршрут обработки).

6. Для указанных технологических процессов анализировались технологические параметры деталей (размеры, точность и шероховатость поверхностей, вид заготовки, точность взаимного расположения поверхностей, вид термической обработки, материал детали, целевая функция технологического процесса и т.д.). Определялись допустимые диапазоны указанных параметров, определяющих общий (типовой) маршрут обработки детали.

7. Составлялся технологический образ – комплексный чертеж детали с допустимыми диапазонами параметров, соответствующий каждому типовому процессу.

В дальнейшем при соответствии параметров новой детали технологическому образу из базы знаний вызывался соответствующий типовой технологический процесс.

В процессе эксплуатации системы пункты 1–7 постоянно уточняются.

Нельзя не отметить тот факт, что наряду с унификацией технологических решений конструкторским подразделениям давались рекомендации по унификации конструкций деталей.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Попов Э.Ф., Фирман Г.Р. Алгоритмические основы интеллектуальных роботов и искусственного интеллекта. М.: Физматлит, 1976. 456 с.
2. Казаков П.В. Автоматизация концептуального проектирования технических систем на основе применения системологии инженерных знаний // *Материалы 9-й национальной конференции по искусственному интеллекту*. Т. 3. М.: Физматлит, 2004. С. 994–1001.
3. Палюх Б.В., Бурдо Г.Б. Представление знаний в системах автоматизированного проектирования и управления технологическими процессами // *Вестник ТГТУ*. 2010. Т. 16. № 2. С. 258–265.
4. Бурдо Г.Б., Палюх Б.В. Повышение эффективности управления технологическими установками в условиях штучного и серийного производства // *Вестник ДонГТУ*. 2009. Т. 9. № 4 (43). С. 659–666.
5. Цветков В.Д. Системно-структурное моделирование и автоматизация проектирования технологических процессов / под ред. П.И. Ящерицына. Минск: Наука и техника, 1979. 261 с.
6. Болотов А.Н., Бурдо Г.Б. Оценка качества решений при проектировании операций механической обработки // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2020. № 4 (8). С. 68–76.
7. Fatima A., Nazir N., Khan M.G. Data cleaning in data warehouse: a survey of data pre-processing techniques and tools // *International Journal of Information Technology and Computer Science*. 2017. V. 3. P. 50–61.

**Для цитирования:** Бурдо Г.Б., Болотов А.Н. Механизм машинного обучения в системах автоматизированного проектирования // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2021. № 4 (12). С. 66–75.

## MACHINE LEARNING MECHANISM IN AUTOMATED DESIGN SYSTEMS

G.B. BURDO, Dr. Sc., A.N. BOLOTOV, Dr. Sc.

Tver State Technical University, 22, Af. Nikitin emb., 170026, Tver,  
Russian Federation, e-mail: gbtms@yandex.ru

The article presents the results of a study describing the way knowledge is represented in computer-aided design and process control systems for single and small-scale. Knowledge is proposed to be represented in the form of three types of functions inherent in human thinking. The formation of new knowledge based on previous experience is shown.

*Keywords:* technological processes, automated design, artificial intelligence, knowledge descriptions.

## REFERENCES

1. Popov E.F., Firman G.R. *Algoritmicheskie osnovy intellektualnyh robotov i iskusstvennogo intellekta* [Algorithmic foundations of intelligent robots and artificial intelligence]. Moscow: Fizmatlit, 1976. 456 p.
2. Kazakov P.V. Automation of conceptual design of technical systems based on the application of systemology of engineering knowledge. *Materialy 9 nacionalnoj konferencii po iskusstvennomu intellektu*. V. 3. Moscow: Fizmatlit, 2004, pp. 994–1001. (In Russian).
3. Palukh B.V., Burdo G.B. Knowledge representation in computer-aided design and process control systems. *Vestnik TGTU*. 2010. V. 16. No. 2, pp. 258–265. (In Russian)
4. Burdo G.B., Palyuh B.V. Improving the efficiency of control of technological installations in the conditions of piece and serial production. *Vestnik DonGTU*. 2009. V. 9. No. 4 (43), pp. 659–666. (In Russian).
5. Cvetkov V.D. *Sistemno-strukturnoe modelirovanie i avtomatizaciya proektirovaniya tekhnologicheskikh processov* [System-structural modeling and design automation of technological processes] / ed. P.I. Yashchericya. Minsk: Nauka i tekhnika, 1979. 261 p.
6. Bolotov A.N., Burdo G.B. Assessment of the quality of solutions in the design of machining operations. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya «Tekhnicheskie nauki»*. 2020. No. 4 (8), pp. 68–76. (In Russian).
7. Fatima A., Nazir N., Khan M.G. Data cleaning in data warehouse: A survey of data pre-processing techniques and tools. *International Journal of Information Technology and Computer Science*. 2017. V. 3, pp. 50–61.

Поступила в редакцию/received: 19.07.2021;  
после рецензирования/revise: 27.09.2021; принята/accepted: 01.10.2021

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ГАЗОЛАЗЕРНОЙ РЕЗКИ ВЫСОКОЛЕГИРОВАННОЙ СТАЛИ

Д.А. ЗОРЕНКО, канд. техн. наук

Тверской государственный технический университет,  
170026, Тверь, наб. Аф. Никитина, д. 22, e-mail: dzorenko@yandex.ru

© Зоренко Д.А., 2021

В статье представлены основные результаты CAE-моделирования процесса газолазерной резки высоколегированной стали. Рассмотрены особенности создания расчетных моделей и полученных с их помощью параметров процесса. Получены картины температурных полей и распределения коэффициента запаса прочности по пределу текучести стали.

*Ключевые слова:* газолазерная резка, температурное поле, метод конечных элементов, сталь, расчетная модель.

**DOI: 10.46573/2658-5030-2021-4-76-81**

### ВВЕДЕНИЕ

Лазерный раскрой металлов в современном машиностроении является одной из распространенных технологических операций заготовительного производства [1–5]. Газолазерная резка, по сравнению с другими способами разделения материалов, имеет ряд преимуществ: получение узких резов с небольшой зоной термического влияния благодаря острой фокусировке лазерного излучения; высокая производительность процесса; возможность автоматизации, контроля, осуществления многопозиционной обработки. Газолазерной резкой можно разделять практически любые материалы независимо от их твердости.

При термическом воздействии лазерного излучения происходит изменение агрегатного состояния вещества (плавление, испарение). Для эффективного удаления расплава осуществляют продувку канала реза вспомогательным газом (используют кислород, воздух, азот, ряд инертных газов). Одним из основных видов лазерного раскроя является газолазерная резка с продувкой струей азота под давлением, позволяющей интенсифицировать процесс и увеличить толщину раскраиваемого металла, а также защитить поверхность реза от окисления.

Несмотря на обширный экспериментальный и теоретический материал, накопленный многими учеными в мире за последние годы, из-за сложности и многофакторности протекающих процессов технология газолазерной резки до конца не понята, поэтому роль моделирования процесса чрезвычайно важна [6, 7]. Целью работы является моделирование при помощи расчетных комплексов, основанных на методе конечных элементов, процесса газолазерной резки с продувкой азотом листа высоколегированной стали.

### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В настоящее время существует несколько CAE-систем, позволяющих моделировать различные этапы газолазерной резки. Для решения поставленной задачи была выбрана система прочностного анализа APM FEM, предназначенная для работы в интерфейсе российской САД-системы КОМПАС-3D. Расчетный комплекс работает на

основе метода конечных элементов, который является численным методом решения дифференциальных уравнений с частными производными, а также интегральных уравнений, использующихся при решении задач прикладной физики. Метод широко применяется для решения задач механики деформируемого твердого тела, теплообмена, газо- и гидродинамики, электродинамики и топологической оптимизации.

При моделировании процесса газолазерной резки с продувкой азотом листа высоколегированной стали исходными данными являлись температура нагрева поверхности лучом – 1 600 °С; диаметр сфокусированного луча – 0,3 мм; диаметр струи азота – 2 мм. Давление азота в системе было принято равным 0,81 МПа. Толщина раскраиваемого листа – 5 мм, зазор между листом и торцом сопла – 3 мм.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

С целью упрощения моделирования процесс раскроя условно разделили на три составляющих, каждая из которых моделировалась на отдельном этапе. На первом этапе производилось моделирование воздействия струи азота на поверхность раскраиваемого листа (рис. 1). В результате было установлено максимальное значение давления, воздействующего на раскраиваемую сталь (860 кПа).

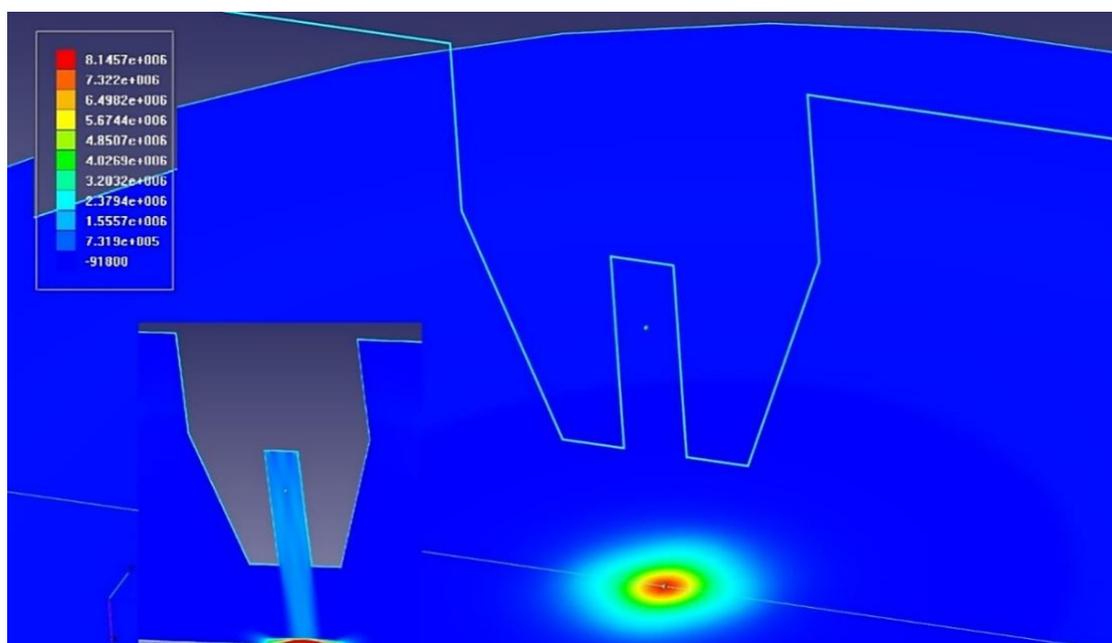


Рис. 1. Распределение значений давления струи азота по поверхности раскраиваемого листа

На втором этапе моделировался процесс нагрева листа лучом лазера. Ниже представлены значения распределения температуры в массиве раскраиваемого материала при первоначальном контакте луча с поверхностью:

Расстояние от поверхности, мм	0,01	0,05	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4	0,5	0,7	6,0
Температура, °С	1 580	1 460	1 300	980	740	610	580	470	350	190	110	20

На основании указанных данных можно сделать вывод, что точка наибольшей температуры находится непосредственно в месте контакта раскраиваемой поверхности с лучом в первую секунду процесса. Температурное воздействие луча лазера на поверхность и давление струи азота являются основными воздействующими факторами, определяющими скоростные свойства процесса и технологические возможности. Они указывают на наиболее эффективно раскраиваемые толщины стальных листов.

Проверку результатов моделирования тепловых полей при газолазерной резке с продувкой азотом осуществляли по размерам зоны термического влияния образцов конструкционной и быстрорежущей стали, подвергнутых газолазерной резке [8, 9]. Известно, что для каждой марки стали существуют критические температуры, при которых происходят фазовые превращения. Сопоставление экспериментальных данных с результатами расчетов показало хорошее соответствие с точностью 5–10 %. Этого достаточно для практического использования результатов расчета при оценке протяженности зоны лазерного воздействия.

На третьем этапе (при наличии данных о распределении температуры в объеме материала) производилось моделирование напряженного состояния с учетом давления струи азота. Результаты представлены на рис. 2. При этом определяли коэффициент запаса прочности – величину, показывающую способность конструкции выдерживать прилагаемые к ней нагрузки, которые выше расчетных. Запас прочности обеспечивает дополнительную надежность конструкции. Если такой запас имеется, то можно избежать повреждений и разрушений в случае возможных ошибок при проектировании, изготовлении или эксплуатации.



Рис. 2. Распределение значений коэффициента запаса прочности по пределу текучести быстрорежущей стали Р6М5 в зоне газолазерной резки

Коэффициентом запаса прочности по пределу текучести  $N$  называется отношение предела текучести материала  $\sigma_m$  к значению действующих напряжений в материале  $Q$ . При  $N = 1,5$  вероятность разрушения составляет 1 %, при  $N = 0,01$  – 100 %. Ниже представлены результаты расчетов этой характеристики:

Расстояние от центра, мм	0	0,1	0,15	0,2
$N$	0,06	0,053	0,043	0,1

На основе распределения значений коэффициента запаса прочности по пределу текучести  $N$  видно, что в зоне действия струи азота при рассматриваемых температурах значение сильно ниже единицы. Это свидетельствует о гарантированном разрушении стали Р6М5 при нагреве лазерным излучением и давлении струи азота.

Таким образом, можно сделать вывод о достаточной эффективности принятых режимов раскроя быстрорежущей стали. В результате работы получена расчетная модель процесса газолазерной резки инструментальной стали. Показана возможность приближенного описания процесса без проведения связанных с ним вычислений. Полученная модель позволяет отслеживать основные параметры процесса и их временные изменения. Результат представленного САЕ-моделирования может служить основой для создания более точных расчетных моделей газолазерной резки.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение метода конечных элементов дает возможность быстро, эффективно и достоверно моделировать процесс газолазерной резки высоколегированной стали. Результаты моделирования показали хорошую корреляцию с результатами реального технологического процесса.

В дальнейшем возможно повышение точности моделирования за счет использования больших вычислительных мощностей. Кроме того, большего приближения к реальному процессу можно достичь при проведении сопряженных вычислений, в которых учитываются одновременно как температурные, так и механические воздействия в процессе раскроя.

Расчетный конечно-элементный модуль АРМ FEM фирмы АСКОН позволяет успешно решать задачи моделирования такого сложного процесса, как газолазерная резка высоколегированной стали.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Харанжевский Е.В., Кривилев М.Д. Физика лазеров, лазерные технологии и методы математического моделирования лазерного воздействия на вещество. Ижевск: Удмуртский университет, 2011. 187 с.
2. Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Мисюрлов А.И. Технологические процессы лазерной обработки. М.: МГТУ, 2006. 664 с.

3. Sobih M., Crouse P.L., Li L. Striation-free fibre laser cutting of mild steel sheets // *Applied Physics A: Materials Science and Processing*. 2008. V. 90 (1). P. 171–174.

4. Ermolaev G.V., Kovalev O.B. Simulation of surface profile formation in oxygen laser cutting of mild steel due to combustion cycles // *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2009. V. 42 (18). P. 4236–4244.

5. Kovalev O.B., Yudin P.V., Zaitsev A.V. Modeling of flow separation of assist gas as applied to laser cutting of thick sheet metal // *Applied Mathematical Modelling*. 2009. V. 33 (9). P. 3730–3745.

6. Petring D., Molitor T., Schneider F., Wolf N. Diagnostics, modeling and simulation: Three keys towards mastering the cutting process with fiber, disk and diode lasers // *Physics Procedia*. 2012. V. 39. P. 186–196.

7. Зоренко Д.А. Моделирование лазерного раскроя стального проката // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2021. № 3 (11). С. 63–68.

8. Макозюба Д.А., Ступина Т.М., Зоренко Д.А., Вареца Р.С., Афанасьева Л.Е. Влияние вспомогательных газов кислорода и азота на технологическую прочность зоны лазерного воздействия при раскрое стали 15пс // *Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел, деталей технологического и энергетического оборудования*. 2009. № 2. С. 142–145.

9. Афанасьева Л.Е., Измайлов В.В., Новоселова М.В. Микротопография и микроструктура поверхности быстрорежущей стали после газолазерной резки // *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*. 2021. № 5. С. 68–75.

**Для цитирования:** Зоренко Д.А. Моделирование газолазерной резки высоколегированной стали // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2021. № 4 (12). С. 76–81.

## **SIMULATION OF GAS LASER CUTTING OF HIGH-ALLOY STEEL**

D.A. ZORENKO, Cand. Sc.

Tver State Technical University, 22, Af. Nikitin emb.,  
170026, Tver, Russian Federation, e-mail: dzorenko@yandex.ru

The article presents the main results of CAE-modeling of the process of gas laser cutting of high-alloy steel. The features of the creation of computational models and the process parameters obtained with their help are considered. The pictures of the temperature fields and the distribution of the safety factor over the yield strength of steel have been obtained.

*Keywords:* laser cutting, temperature field, finite element method, steel, laser cutting, calculation model.

## REFERENCES

1. Kharanzhevsky E.V., Krivilev M.D. Fizika lazerov, lazernyye tekhnologii i metody matematicheskogo modelirovaniya lazernogo vozdeystviya na veshchestvo [Physics of lasers, laser technologies and methods of mathematical modeling of laser action on matter]. Izhevsk: Udmurtskiy universitet, 2011. 187 p.
2. Grigoryants A.G., Shiganov I.N., Misyurov A.I. Tekhnologicheskiye protsessy lazernoy obrabotki [Technological processes of laser processing]. M.: MGTU, 2006. 664 p.
3. Sobih M., Crouse P.L., Li L. Striation-free fibre laser cutting of mild steel sheets. *Applied Physics A: Materials Science and Processing*. 2008. V. 90 (1), pp. 171–174.
4. Ermolaev G.V., Kovalev O.B. Simulation of surface profile formation in oxygen laser cutting of mild steel due to combustion cycles. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2009. V. 42 (18), pp. 4236–4244.
5. Kovalev O.B., Yudin P.V., Zaitsev A.V. Modeling of flow separation of assist gas as applied to laser cutting of thick sheet metal. *Applied Mathematical Modelling*. 2009. V. 33 (9), pp. 3730–3745.
6. Petring D., Molitor T., Schneider F., Wolf N. Diagnostics, modeling and simulation: Three keys towards mastering the cutting process with fiber, disk and diode lasers. *Physics Procedia*. 2012. V. 39, pp. 186–196.
7. Zorenko D.A. Modeling of laser cutting of steel rolled products. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya «Tekhnicheskiye nauki»*. 2021. No. 3 (11), pp. 63–68. (In Russian).
8. Makozyuba D.A., Stupina T.M., Zorenko D.A., Varetsa R.S., Afanasieva L.E. Influence of auxiliary gases oxygen and nitrogen on the technological strength of the zone of laser action during cutting of steel 15ps. *Mekhanika i fizika protsessov na poverkhnosti i v kontakte tverdykh tel, detaley tekhnologicheskogo i energeticheskogo oborudovaniya*. 2009. No. 2, pp. 142–145. (In Russian).
9. Afanasieva L.E., Izmaylov V.V., Novoselova M.V. Microtopography and microstructure of the surface of high-speed steel after gas-laser cutting. *Poverkhnost. Rentgenovskiy, sinkhrotronnyy i neytronnyy issledovaniya*. 2021. No. 5, pp. 68–75. (In Russian).

Поступила в редакцию/received: 07.04.2021; после рецензирования/revised: 20.05.2021;  
принята/accepted: 01.06.2021

## **ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ДАТЧИКОВ ДЛЯ МОНИТОРИНГА ПАРАМЕТРОВ ДУГИ УСТАНОВКИ СИНТЕЗА УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК ПЛАЗМОХИМИЧЕСКИМ МЕТОДОМ**

И.М. ЖАББАРОВ, аспирант, А.В. ЮДИН, д-р техн. наук

Рыбинский государственный авиационный технический университет  
имени П.А. Соловьева, 152934, Ярославская область, г. Рыбинск, ул. Пушкина, д. 53,  
e-mail: JudinAV@mail.ru

© Жаббаров И.М., Юдин А.В., 2021

В статье рассмотрена проблема электромагнитной совместимости датчиков для мониторинга параметров дуги плазматрона. Произведен краткий анализ публикаций о причинах помех и способах борьбы с ними. Проанализировано влияние тока дуги плазматрона на токоизмерительный датчик и рассчитана величина наводимой электродвижущей силы (ЭДС). Проведен натурный эксперимент с измерением величины наводимой ЭДС при помощи осциллографа. Выработаны рекомендации по улучшению условий электромагнитной совместимости.

*Ключевые слова:* плазматрон, датчик, помеха, источник питания, электромагнитная совместимость, синтез углеродных нанотрубок.

**DOI: 10.46573/2658-5030-2021-4-82-90**

### **ВВЕДЕНИЕ**

Для мониторинга параметров и состояния установки синтеза углеродных нанотрубок плазмохимическим методом, а также автоматизации происходящих в ней процессов необходимо применять множество различных датчиков. В основном применяются датчики тока плазматрона, термопары с преобразователями сигнала из аналоговой формы в цифровую, вакуумные датчики давления, датчики избыточного давления в камере и т.д. От стабильности и точности работы каждого датчика зависит точность регулирования параметров установки. Для обеспечения достоверности информации с датчиков и бесперебойной передачи сигнала на управляющий контроллер важно учитывать чувствительность измерительных цепей к внешнему воздействию электромагнитных полей, а также наличие помех в цепях питания. В случае аналоговых датчиков появляется шум в измеренном сигнале, а в случае использования датчиков с цифровым выходом передача сигнала может совсем прерваться. Плазма и блок питания плазматрона являются источниками сильного электромагнитного излучения, величина которого зависит от мощности установки и условий распространения.

### **АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОМЕХ И МЕТОДОВ БОРЬБЫ С НИМИ**

Проблеме влияния электромагнитных помех на датчики и методам борьбы с ними в последнее время уделяют много внимания. В статье [1] описываются виды помех и способы борьбы с ними. Авторы разделили все помехи в автоматизированных системах на виды:

- помехи, возникающие от сети электроснабжения;
- молния и атмосферное электричество;
- влияние статического электричества;
- помехи, возникающие через индуктивные связи;
- электромагнитные помехи;
- помехи, возникающие от неправильно проведенных заземлений [1].

Наибольшее влияние на систему промышленной автоматики оказывают помехи от сети электроснабжения:

- с фоном частотой 50 Гц;
- выбросы напряжения из-за разряда молнии;
- кратковременные затухающие колебания при переключении индуктивной нагрузки [1].

Один из методов борьбы с помехами – правильное конструирование систем автоматизации. К нему относятся анализ технических требований к условиям работы, уменьшение ширины полосы пропускания аналоговых модулей, применение гальванической развязки (для уменьшения влияния кондуктивных помех), использование коротких линий для передачи сигнала и питания датчиков, применение датчиков с цифровым интерфейсом.

В статье [2] рассматриваются методы повышения устойчивости датчиков к помехам, а также обеспечение электромагнитной совместимости во время их работы. Авторы публикации предлагают бороться с помехами на этапе разработки датчиков.

Основные методы борьбы с помехами, влияющими на датчики:

- анализ среды эксплуатации оборудования для установления влияния электромагнитных полей;
- ведение статистики сбоев работы датчиков и оборудования;
- определение типа помехи (индуктивная, кондуктивная или емкостная) и ее источника;
- правильное зонирование помещения с оборудованием;
- размещение кабельных связей помещения на отдельном (кабельном) полуэтаже.

В совокупности данные решения помогут уменьшить влияние помех на работу датчиков и оборудования в целом, а также повысить стабильность работы устройств.

В статье [3] рассматриваются способы решения проблем с электромагнитной совместимостью, создание блока электромагнитной совместимости. Основными способами защиты приборов от помех и перенапряжений являются использование фильтров низких частот и применение полупроводниковых ограничителей перенапряжения – варисторов и стабилитронов. Однако эти способы позволяют защитить устройства только от кондуктивных помех.

В статье [5] авторы разделяют воздействия на датчики в автоматизированной системе на виды:

- воздействие через кондуктивные связи;
- влияние неэквипотенциальности «земли»;
- наводки через взаимную индуктивность;
- наводки через емкостные связи;
- высокочастотные электромагнитные наводки [5].

Кондуктивные погрешности при передаче сигнала могут быть вызваны падением напряжения на участке провода, который является общим для сигнала и нагрузки. Для решения подобных проблем авторы предлагают подключать «землю» источника сигнала к «земле» приемника отдельным кабелем. Не стоит использовать «землю» сигнального провода в качестве цепи питания [5].

Если рядом с сигнальным проводом проходит электрическая цепь, по которой протекает ток, то вследствие явления электромагнитной индукции на сигнальной линии будут наводиться помехи. Данное явление называется индуктивной помехой. Для снижения эффекта авторы статьи предлагают располагать сигнальный провод максимально близко к «земле» и использовать идеальный источник тока. На постоянном токе индуктивная помеха отсутствует, а на переменном – увеличивается с ростом частоты тока.

Емкостная помеха возникает на паразитной емкости между проводниками и определяется величиной внутреннего сопротивления источника сигнала. Для устранения помехи авторы предлагают передавать сигнал с помощью идеального источника напряжения.

Чтобы повысить степень защищенности сигнала, следует производить экранирование сигнальных проводов, применять параллельно соединенные витые пары. При этом экран должен быть подключен к «земле» либо источника сигнала, либо приемника, поскольку по экрану будет протекать ток [5].

Все эти рекомендации необходимо учитывать и при проектировании системы управления установкой синтеза углеродных нанотрубок плазмохимическим методом.

### **ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ТОКА ДУГИ ПЛАЗМОТРОНА НА ДАТЧИКИ И РАСЧЕТ ВЕЛИЧИНЫ НАВОДИМОЙ ЭЛЕКТРОДВИЖУЩЕЙ СИЛЫ (ЭДС)**

Внедрение датчиков в состав установки синтеза углеродных нанотрубок плазмохимическим методом и их испытания происходили поэтапно. Одним из основных рабочих параметров установки является ток плазмотрона. Обычно в качестве датчика тока в сварочных аппаратах и источниках питания для плазмотрона используется токоизмерительный шунт. Однако у данного вида измерения имеются недостатки: отсутствие гальванической развязки, увеличение погрешности из-за нагрева шунта протекающими высокочастотными токами, а также поверхностный эффект. В связи с этим для измерения использовался датчик тока на эффекте Холла ACS758 (с диапазоном измеряемого тока до 100 А). Достоинство датчиков на эффекте Холла заключается в их способности измерять постоянный, переменный и импульсные токи.

Питание датчика осуществляется от внешнего источника. Датчик подключается в разрыв цепи, в которой производится измерение тока. На цепи питания установлены цепи защиты от бросков напряжения в виде TVS-диода. Конструкция интегрального датчика показана на рис. 1.

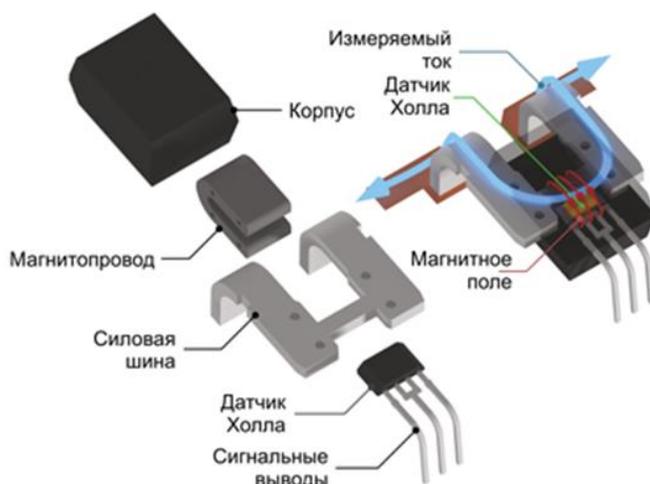


Рис. 1. Интегральный датчик тока на эффекте Холла

При применении датчика для измерения тока от лабораторного источника тока проблем с измерениями не возникало. Попытка измерения тока от блока питания плазматрона привела к выходу датчика из строя. Величина выходного тока плазматрона при этом не была превышена относительно рабочего диапазона токов датчика. Кроме того, вышел из строя амперметр, подключенный к датчику тока. Источник плазмы работал без внешнего экрана, датчик тоже не был экранирован.

Для снижения уровня помех было проведено экранирование сигнальных и питающих проводов. Плазмотрон поместили в реакционную камеру из нержавеющей стали. Дальнейшие испытания проводились с использованием датчика тока на эффекте Холла, конструктивно представляющего собой моноблок, содержащий магнитопровод в виде кольца и интегрированный усилитель сигнала (рис. 2).

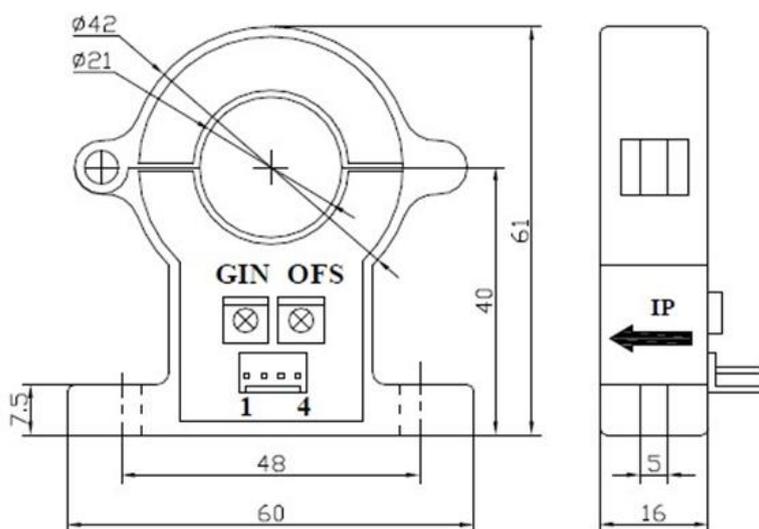


Рис. 2. Датчик тока на эффекте Холла с магнитопроводом

Основное достоинство такой конструкции заключается в увеличении расстояния от проводника с током до встроенного усилителя. В результате принятых мер датчик не выходит из строя, но его показания значительно отличаются от уставки по току блока питания плазматрона, и это говорит о том, что уровень наведенных помех все еще очень высок.

Для оценки уровня электромагнитных помех произведем теоретические расчеты магнитного поля проводника с током, величины наводимой ЭДС в датчике тока, расположенном на питающем проводе плазматрона.

Силовые линии магнитного поля, созданного прямолинейным проводником с током  $I$ , представляют собой кольцевые линии. При этом для точки, расположенной на расстоянии  $R$  от оси проводника, модуль напряженности

$$H = \frac{I}{2\pi R} ,$$

а направление, определяемое по правилу правого винта, совпадает с направлением касательной. Однако данная формула не очень удобна для решения частной задачи анализа поля, созданного системой  $n$  параллельных проводников, расположенных по

определенному радиусу. Рассмотрим методику анализа напряженности магнитного поля для объекта подобного типа.

В общем случае напряженность магнитного поля, созданного током  $I$ , протекающим по направленному элементу проводника  $d\vec{s}$ , расположенного в некоторой точке пространства (рис. 3), определяется с помощью закона Био – Савара – Лапласа:

$$d\vec{H} = \frac{1}{4\pi} \frac{I}{R^3} [d\vec{s} \vec{R}],$$

где  $d\vec{H}$  – напряженность поля;  $\vec{R}$  – радиус-вектор, проведенный из элемента проводника в эту точку пространства;  $R$  – модуль радиус-вектора.

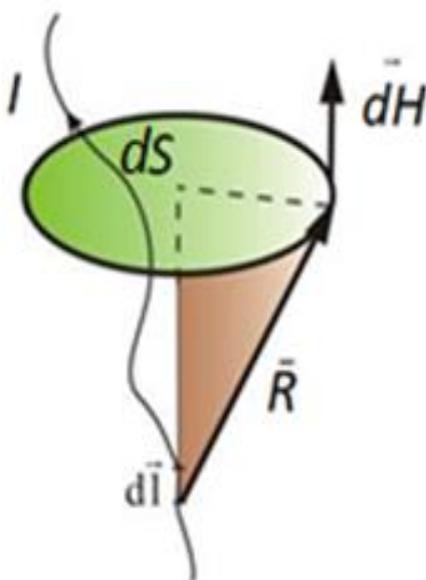


Рис. 3. Магнитное поле и напряженность вокруг проводника с током

Выразим векторные величины через их компоненты:

$$d\vec{H} = dH_x \vec{i} + dH_y \vec{j} + dH_z \vec{k};$$

$$d\vec{s} = dx \vec{i} + dy \vec{j} + dz \vec{k};$$

$$\vec{R} = R_x \vec{i} + R_y \vec{j} + R_z \vec{k}.$$

Распишем векторное произведение через компоненты векторов. Для этого составим определитель и решим его:

$$\begin{aligned} [d\vec{s} \vec{R}] &= \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ dx & dy & dz \\ R_x & R_y & R_z \end{vmatrix} = \vec{i} \begin{vmatrix} dy & dz \\ R_y & R_z \end{vmatrix} - \vec{j} \begin{vmatrix} dx & dz \\ R_x & R_z \end{vmatrix} + \vec{k} \begin{vmatrix} dx & dy \\ R_x & R_y \end{vmatrix} = \\ &= \vec{i} (R_z dy - R_y dz) - \vec{j} (R_z dx - R_x dz) + \vec{k} (R_y dx - R_x dy). \end{aligned}$$

Для системы проводников, ориентированной в направлении одной из осей координат (например, оси аппликат) имеем:  $dx = 0$ ,  $dy = 0$ .

В соответствии с этим для векторного произведения и вектора напряженности получим:

$$\begin{aligned} [d\bar{s} \ \bar{R}] &= (R_x \bar{j} - R_y \bar{i}) dz; \\ d\bar{H} &= \frac{I}{4\pi R^3} (R_x \bar{j} - R_y \bar{i}) dz. \end{aligned}$$

Будем рассматривать напряженность поля  $H$ , созданную элементом единичной длины, т.е. при  $dz = 1$ . В этом случае после интегрирования для всего проводника бесконечной длины получим для напряженности поля в точке  $Q(x_2, y_2)$ , созданной элементом тока, расположенным в точке  $P(x_1, y_1)$ :

$$\bar{H} = \frac{I(- (y_2 - y_1) \bar{i} + (x_2 - x_1) \bar{j})}{4\pi \sqrt{((x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2)^{3/2}}}.$$

Определим поле напряженностей в заданной области  $D$ , ограниченной равномерно распределенными по радиусу  $n$  параллельными проводниками. Координаты точек расположения проводников  $P_k(x_k, y_k)$ , где  $k = 0, 1, \dots, n - 1$ , определяются с помощью формулы Муавра:

$$x_k = \operatorname{Re} \left( e^{j \frac{2\pi k}{n}} \right); \quad y_k = \operatorname{Im} \left( e^{j \frac{2\pi k}{n}} \right).$$

Для исследования распределения напряженности поля в пространстве, заданном прямоугольной сеткой, разработана функция  $hpset(I, P, X, Y)$ . Первый и второй параметры этой функции задают величину тока и координаты точки расположения прямолинейного проводника с током. Третий и четвертый параметры  $X = (x_1, x_2, \dots, x_N)$ ,  $Y = (y_1, y_2, \dots, y_M)$  определяют абсциссы и ординаты сетки. Вычисления производят последовательно для каждой точки сетки. Результатом является многомерный массив, содержащий две прямоугольные матрицы: матрицу проекций векторов напряженности на ось абсцисс и матрицу проекций векторов напряженности на ось ординат. На основе этой функции проводится расчет напряженности в пространстве между двумя проводниками. Амплитуды напряженностей определяются в результате геометрического суммирования рассчитанных компонентов напряженности.

В результате расчета распределения напряженности магнитного поля между проводниками при токе плазмотрона 50 А получаем диаграмму (рис. 4).

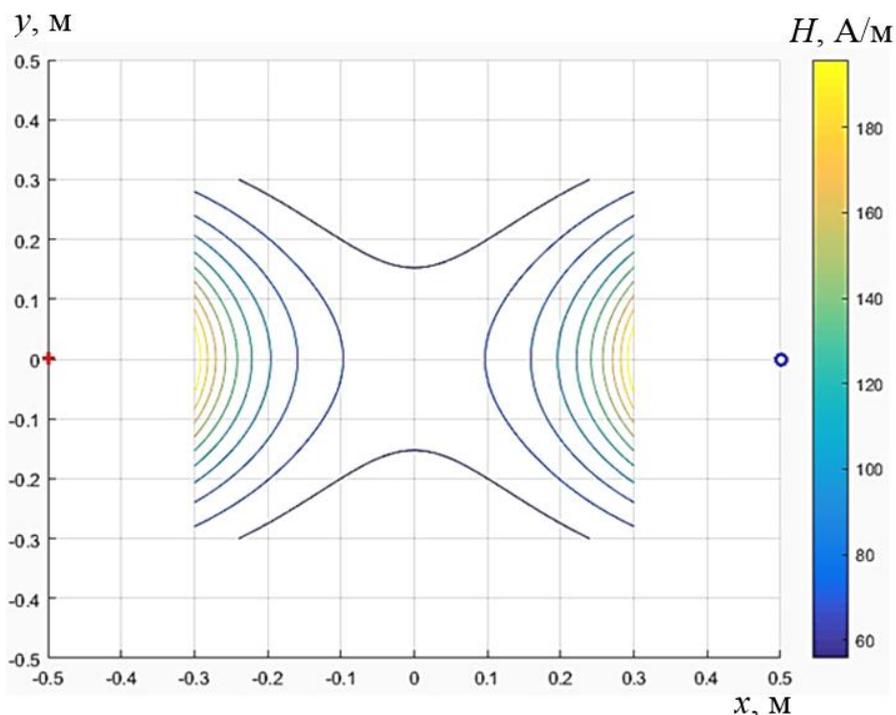


Рис. 4. Диаграмма распространения напряженности магнитного поля

Для расчета индукции достаточно умножить значение напряженности на значение магнитной проницаемости вакуума, считая относительную магнитную проницаемость окружающей среды равной единице.

Для расчета наведенной ЭДС воспользуемся формулой [6, 7]

$$E = 4fSBw,$$

где  $f$  – частота тока в проводнике, Гц;  
 $S$  – площадь поперечного сечения датчика тока,  $\text{м}^2$ ;  
 $B$  – индукция магнитного поля, Тл;  
 $w$  – число витков псевдоторичной обмотки.

Расчетная величина наводимой ЭДС составляет 400 мВ. Расчет производится при частоте тока в проводнике 20 кГц, расстояние от плазматрона до датчика тока составляет 0,5 м, площадь петли измерительной цепи датчика тока задана равной 0,003  $\text{м}^2$ .

### ПРОВЕДЕНИЕ НАТУРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Для сопоставления расчетных данных с практическими был проведен эксперимент. К щупам осциллографа *Rigol DS1052E* подключили антенну в виде петли из медного провода (длина – 20 см; поперечное сечение – 6  $\text{мм}^2$ ). Антенна от осциллографа расположили на расстоянии 1 м от работающего плазматрона и на расстоянии 0,5 м от источника питания. Провод от источника питания до плазматрона расположили горизонтально. Ток источника питания выставили на 25 А, после чего запустили плазматрон. Осциллограф через петлю-антенну фиксировал пульсации электромагнитного поля с частотой 200 кГц и амплитудой 600 мВ. На рис. 5 приведен снимок показаний осциллографа.

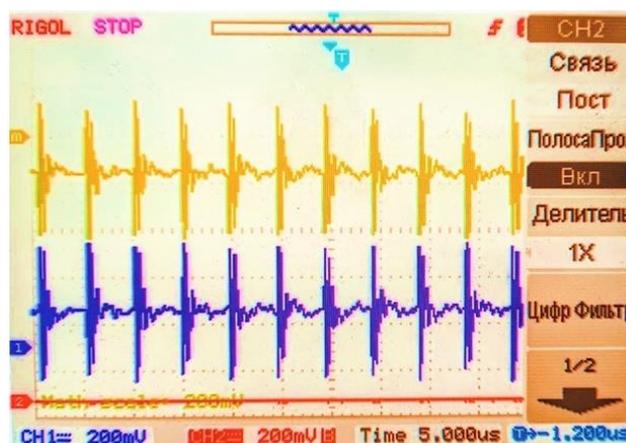


Рис. 5. Показания осциллографа во время работы плазмотрона

Существует разница между измеренной величиной, наведенной ЭДС (600 мВ), и расчетной (400 мВ), что может быть объяснено наличием дополнительных контуров в цепях осциллографа. Как и ожидалось, при увеличении расстояния от антенны до плазмотрона наведенная ЭДС уменьшается. В целом можно сделать вывод о возможности применения данной методики в дальнейших исследованиях.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В качестве мер по снижению влияния электромагнитного поля на датчики было проведено экранирование столба дуги в камере из нержавеющей стали, что позволило снизить амплитуду наводимых пульсаций до 400 мВ. Применение дополнительных фильтров в источнике питания датчика тока не принесло результата. Наиболее эффективным вариантом представляется использование внешнего аккумуляторного питания для датчиков и всей измерительной электроники. Это позволит избавиться от помех, наводимых по цепям питания устройств (кондуктивных). Кроме того, на уменьшение величины помех оказывает значительное влияние уменьшение длины питающих проводов от аккумулятора до датчика, поскольку уменьшается площадь для воздействия магнитного поля. Источник питания плазмотрона также необходимо заземлять.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Жумаев О.А., Шермурадова М.Ф., Бабаев А.А. Защита от помех технических средств автоматизации систем управления // *Наука, техника и образование*. 2018. № 7 (48). С. 36–40.
2. Сарылов О.В. Методика обеспечения качества функционирования датчиков давления в условиях электромагнитных помех на всех этапах жизненного цикла // *The Scientific Heritage*. 2020. № 43. С. 33–37.
3. Захаров А. Защита промышленных приборов в соответствии с нормами по электромагнитной совместимости // *Компоненты и технологии*. 2006. № 5. С. 124–129.
4. Данилов А. Современные промышленные датчики тока // *Современная электроника*. 2004. № 10. С. 26–35.
5. Денисенко В., Халявко А. Защита от помех датчиков и соединительных проводов систем промышленной автоматизации // *Современные технологии автоматизации*. 2001. № 1. С. 68–75.
6. Белопольский И.И., Каретникова Е.И., Пикалова Л.Г. Расчет трансформаторов и дросселей малой мощности. М.: Альянс, 2008. 400 с.

7. Стародубцев Ю.Н. Теория и расчет трансформаторов малой мощности. М.: РадиоСофт, 2005. 320 с.

**Для цитирования:** Жаббаров И.М., Юдин А.В. Особенности применения датчиков для мониторинга параметров дуги установки синтеза углеродных нанотрубок плазмохимическим методом // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2021. № 4 (12). С. 82–90.

## **APPLICATION FEATURES OF THE SENSORS FOR MONITORING THE ARC PARAMETERS OF THE CARBON NANOTUBE SYNTHESIS PLANT BY THE PLASMA CHEMICAL METHOD**

I.M. ZHABBAROV, postgraduate, A.V. YUDIN, Dr. Sc.

Soloviev Rybinsk State Aviation Technical University, 53, Pushkin st.,  
152934, Yaroslavl region, Rybinsk, Russian Federation, e-mail: JudinAV@mail.ru

The article devoted to the problem of electromagnetic compatibility of sensors for monitoring the parameters of the plasma torch arc. A brief review of publications with the causes of interference and ways to eliminate them is made. The influence of the arc current of the plasma torch on the current measuring sensor is analyzed and the magnitude of the induced EMF is calculated. A full-scale experiment was carried out with the measurement of the induced EMF using an oscilloscope. Recommendations for improving the conditions of electromagnetic compatibility have been developed.

*Keywords:* plasma torch, sensor, distortion, power source, electromagnetic compatibility, synthesis carbon nanotubes.

### **REFERENCES**

1. Jumaev O.A., Shermuradova M.F., Babayev A.A. Protection from interference of technical means of automation of control systems. *Nauka, tehnika i obrazovanie*. 2018. No. 7 (48), pp. 36–40. (In Russian).
2. Sarylov O.V. Quality operation methodology for pressure sensors under conditions of electromagnetic interference at all stages of the life cycle. *The Scientific Heritage*. 2020. No. 43, pp. 33–37. (In Russian).
3. Zakharov A. Protection of industrial devices in accordance with the norms of electromagnetic compatibility. *Komponenty i tekhnologii*. 2006. No. 5, pp. 124–129. (In Russian).
4. Danilov A. Modern industrial current sensors. *Sovremennaya elektronika*. 2004. No. 10, pp. 26–35. (In Russian).
5. Denisenko V., Khalyavko A. Protection against interference of sensors and connecting wires of industrial automation systems. *Sovremennye tekhnologii avtomatizacii*. 2001. No. 1, pp. 68–75. (In Russian).
6. Belopolsky I.I., Karetnikova E.I., Pikalova L.G. Raschet transformatorov i drossiley maloy moshchnosti [Calculation of low-power transformers and chokes]. Moscow: AlyanS, 2008. 400 p.
7. Starodubtsev Yu.N. Teoriya i raschet transformatorov maloy moshchnosti [Theory and calculation of low power transformers]. Moscow: RadioSoft, 2005. 320 p.

Поступила в редакцию/received: 13.07.2021; после рецензирования/revised: 27.09.2021;  
принята/accepted: 01.10.2021

## ОЦЕНКА ОПАСНЫХ И ВРЕДНЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ФАКТОРОВ В ЭРГАТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ МЕТОДОМ ДИСПЕРСИОННОГО АНАЛИЗА

Н.М. ПУЗЫРЕВ, канд. техн. наук, Д.В. МАРТЫНОВ, канд. техн. наук,  
Н.Б. БАРБАШИНОВА, доцент, А.С. ЕМЦЕВ, аспирант

Тверской государственной технической университет, 170026, Тверь,  
наб. Аф. Никитина, д. 22, e-mail: puzyrevfdpo@rambler.ru

© Пузырев Н.М., Мартынов Д.В.,  
Барбашинова Н.Б., Емцев А.С., 2021

Приведены характеристики опасных и вредных производственных факторов в такой эргатической системе, как электросварочное производство, описано их вредное воздействие на персонал. На основе дисперсионного анализа установлена взаимосвязь между воздействием этих факторов на работников и частичной утратой ими работоспособности с учетом индивидуальных особенностей. Предложена методика решения задач по оценке уровня безопасности на производстве с использованием методов дисперсионного анализа, показывающая, что улучшение экономических показателей деятельности предприятия зависит от создания более безопасных условий труда, приводящих к сокращению потерь рабочего времени.

*Ключевые слова:* системный анализ, эргатическая система, производственная безопасность, опасный производственный фактор, вредный производственный фактор, дисперсионный анализ.

**DOI: 10.46573/2658-5030-2021-4-91-97**

### ВВЕДЕНИЕ

Обеспечение безопасности эргатической системы, которой является любая система, работающая при участии человека и включающая используемые им технические устройства и среду на рабочем месте, – это приоритетная и социально значимая задача во всех видах производственной деятельности. При создании или повышении уровня безопасности условий труда в таких системах необходимо принимать во внимание большое число факторов производственной среды, требований, условий и ограничений, установленных нормативно-правовыми документами при эксплуатации, обслуживании технических устройств и технологических процессов, задействованных в промышленном производстве.

Степень воздействия опасных и вредных производственных факторов (ОВПФ) на работников, занятых в производственной сфере, характеризуется такими показателями, как концентрация вредных веществ в воздушной среде рабочего места, уровни физического воздействия (вибрации, шума, излучения, которые превышают предельно допустимые значения), и многими другими. Комплексную оценку воздействия на персонал ОВПФ можно также произвести, основываясь на показателях экономических потерь, к которым относятся компенсации за утрату работоспособности персонала, затраты на обеспечение безопасности и др. Такие потери и затраты могут быть прямыми и косвенными. К прямым можно отнести компенсацию за временную нетрудоспособность; оплату штрафов; расходы на устройство или усовершенствование средств безопасности, на приобретение или обновление средств индивидуальной и (или) коллективной защиты. К косвенным – частичную остановку производства из-за

отсутствия основного исполнителя по причине временной утраты трудоспособности; поиск; обучение других работников. Ко второй категории также нужно отнести и средства, затрачиваемые на проведение мероприятий по профилактике профессиональных заболеваний, страховые выплаты и др.

Вредные производственные факторы по воздействию на организм работника, занятого в любой производственной сфере (включая сварочное производство), подразделяют на факторы, приводящие к хроническим заболеваниям (в том числе усугубляющие уже имеющиеся заболевания) за счет длительного относительно низкоинтенсивного воздействия, и факторы, приводящие к острым заболеваниям (отравлениям, поражениям) или травмам за счет кратковременного (одиночного и/или практически мгновенного) относительно высокоинтенсивного воздействия [1].

В машиностроении, строительстве и других отраслях промышленного производства широко проводятся ручные электросварочные работы, применяется сварка на автоматических и полуавтоматических машинах в среде углекислого газа с использованием электрической дуги. При выполнении этих видов работ возникают такие ОВПФ, как повышенная запыленность и загазованность воздуха рабочей зоны; ультрафиолетовое, видимое и инфракрасное излучения сварочной дуги; электромагнитные поля; искры и брызги; выбросы расплавленного шлака и металла.

Сварочный процесс сопровождается обильными пылевыделениями, т.е. в производственном помещении образуется большая запыленность токсичной мелкодисперсной пылью, газы выделениями, действующими негативно на организм работника. Наиболее вредными пылевыделениями являются оксиды железа, приводящие к механическому раздражению легочной ткани, хроническому отравлению, дерматозу, поражению центральной нервной системы. Оксиды марганца вызывают заболевания нервной системы, легких, печени и крови, а соединения кремния оказывают разрушающее действие на легкие, что приводит к постоянной одышке, боли в груди, сухому кашлю. Соединения хрома способны накапливаться в организме человека, вызывая головные боли, воспаление желудочно-кишечного тракта, общую слабость. Соединения алюминия вызывают механическое раздражение легочной ткани, снижение гемоглобина в крови. При отсутствии надлежащих средств защиты у электросварщиков могут быть поражены органы зрения (воспаление, электроофтальмия, катаракта и т.п.), могут появиться ожоги кожных покровов. Кроме того, возможно поражение электрическим током, отравление продуктами сварки.

Основными факторами оценивания трудового процесса являются тяжесть труда и его напряженность [2]. Тяжесть труда – это характеристика, отражающая нагрузку на опорно-двигательный аппарат и функциональные системы организма (сердечно-сосудистую, дыхательную и др.). Напряженность труда – характеристика, отражающая нагрузку на центральную нервную систему, органы чувств, эмоциональную сферу.

На основе проведенной на экскаваторном заводе специальной оценки условий труда электросварщиков, выполняющих сварку стрел и рукоятей в среде углекислого газа, были установлены следующие классы условий труда по вредным производственным факторам: по химическому фактору, наличием аэрозолей преимущественно фиброгенного действия и по тяжести трудового процесса – класс 3.1 (вредный), по шуму – класс 3.2 (также вредный).

Подобные условия труда могут вызвать заболевания различной формы и тяжести, снижение работоспособности, отрицательно повлиять на здоровье потомства. В зависимости от количественной характеристики (например, уровня излучения, звукового давления, концентрации вредных вещества и других показателей вредности) и продолжительности воздействия вредный производственный фактор может стать опасным, в результате чего будет велика вероятность возникновения профессионального

заболевания. На предприятии это приведет к потерям рабочего времени и, соответственно, потерям экономическим. Кроме того, стоит отметить, что расходы на оплату труда работников, занятых на участках с тяжелыми и вредными условиями, значительно выше, чем на оплату труда сотрудников, имеющих такую же квалификацию, но занятых на участках с нормальными условиями.

## **ЦЕЛИ И МЕТОДЫ ДИСПЕРСИОННОГО АНАЛИЗА ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ**

Для анализа затрат и экономических потерь, включая потери рабочего времени в зависимости от степени вредности производственного процесса, предлагается использовать дисперсионный анализ. Затраты и потери могут быть вызваны не только состоянием производственной среды. К ним могут относиться затраты на компенсацию потерь в связи с временной нетрудоспособностью, на улучшение условий труда, на средства индивидуальной и коллективной защиты, на проведение профилактических мероприятий и др. При этом потери рабочего времени бывают ненормируемыми (или незапланированными). В этом случае они не запланированы изначально, а поэтому несут в себе угрозу эффективной деятельности предприятия и являются следствием определенных проблем, вызванных различными обстоятельствами, включая условия труда. Именно ненормируемые потери рабочего времени должны сокращаться в первую очередь. Они могут зависеть от состояния здоровья, возраста работников, их квалификации, других индивидуальных характеристик и особенностей организма. Эти и другие зависимости следует оценивать с помощью дисперсионного анализа.

Дисперсионный анализ представляет собой набор статистических методов, предназначенных для обработки экспериментальных данных, зависящих от большого количества одновременно действующих факторов. Целью анализа является оценка влияния факторов на результирующий признак и выявление наиболее значимых из них.

Метод служит для исследования статистической значимости различия средних значений количественного признака для разных уровней категориальных факторов. Его применяют с целью установления влияния некоторого категориального фактора  $F_i$ , имеющего несколько уровней ( $F_1, F_2, \dots, F_p$ ), на зависимую переменную  $X$ . Категориальный фактор выступает в роли независимой переменной, влияющей на зависимую переменную. При однофакторном дисперсионном анализе исследуется влияние одной независимой переменной, имеющей несколько уровней, на одну зависимую переменную [3, 4].

Для производственного участка, где электросварщики выполняют ручную и полуавтоматическую электросварку стрел и рукоятей экскаваторов в среде углекислого газа в условиях с ОВПФ, с помощью однофакторного дисперсионного анализа было проведено исследование оценки длительности частичных потерь работоспособности в зависимости от такой индивидуальной особенности сварщиков, как возраст. Численным показателем потерь работоспособности было принято количество дней нетрудоспособности по медицинским показаниям. Все 12 сварщиков, занятых на рабочих местах с вредными производственными факторами, были разделены на 3 возрастные группы. Требовалось установить, насколько возрастные показатели работников влияют на издержки предприятия в результате частичной утраты работоспособности вследствие воздействия на работников ОВПФ при выполнении ими ручной и полуавтоматической электросварки стрел и рукоятей. В трех классах градации фактора  $F_p$  (1, 2 и 3-я возрастные группы) собраны данные о потерях рабочего времени в течение 4 лет (таблица).

Продолжительность временной утраты работоспособности  
в зависимости от возраста сварщиков

Год	F <sub>1</sub> возрастная группа (18–45 лет)	F <sub>2</sub> возрастная группа (46–55 лет)	F <sub>3</sub> возрастная группа (56 лет и старше)
	Количество дней нетрудоспособности		
2017	3	4	6
2018	0	3	9
2019	4	8	12
2020	6	7	9
Среднее $\bar{X}_i$	3,25	5,50	9,00
Дисперсия $S_i^2$	6,25	5,67	6,00

Число классов градации фактора (групп)  $a = 3$  и в каждом классе (группе)  $n_i = 4$  наблюдения. Общее число наблюдений  $n = 12$ .

Числа степеней свободы:

$$\begin{aligned}v_a &= a - 1 = 3 - 1 = 2; \\v_e &= n - a = 12 - 3 = 9; \\v &= n - 1 = 12 - 1 = 11.\end{aligned}$$

Дисперсия  $S_i^2$  для каждой группы рассчитывается по формуле

$$S_i^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X}_i)^2}{n_i - 1}.$$

Общее среднее наблюдений

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n X_{ij}}{n} = \frac{71}{12} = 5,92.$$

Вычислим суммы квадратов отклонений.

Объясненная влиянием фактора  $a$  сумма квадратов отклонений

$$\begin{aligned}SS_a &= \sum_{i=1}^a n_i (\bar{X}_i - \bar{X})^2 = \\&= 4 \cdot (3,25 - 5,92)^2 + 4 \cdot (5,50 - 5,92)^2 + 4 \cdot (9,00 - 5,92)^2 = 67,17.\end{aligned}$$

Сумма квадратов отклонений ошибки

$$\begin{aligned}SS_e &= \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n (X_{ij} - \bar{X}_i)^2 = \sum_{i=1}^a (n_i - 1) s_i^2 = \\&= (n_1 - 1) s_1^2 + (n_2 - 1) s_2^2 + (n_3 - 1) s_3^2 = \\&= 3 \cdot 6,25 + 3 \cdot 5,67 + 3 \cdot 6,00 = 53,75.\end{aligned}$$

Общая сумма квадратов отклонений:

$$SS = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n (X_{ij} - \bar{X})^2 = \\ = (3 - 5,92)^2 + (0 - 5,92)^2 + \dots + (9 - 5,92)^2 = 120,92.$$

Вычислим дисперсии:

$$MS_a = \frac{SS_a}{a - 1} = \frac{67,17}{2} = 33,58; \\ MS_e = \frac{SS_e}{n - a} = \frac{53,75}{9} = 5,97.$$

Вычислим фактическое отношение Фишера:

$$F = \frac{MS_a}{MS_e} = \frac{33,58}{5,97} = 5,62.$$

Критическое значение отношения Фишера:

$$F_{кр}(0,05; 2; 9) = 4,26.$$

Фактическое отношение Фишера больше критического:

$$F = 5,62 > F_{кр}(0,05; 2; 9) = 4,26.$$

В таком случае при уровне значимости  $\alpha = 0,05$  можно сделать вывод, что из-за частичной утраты работоспособности (болезни) потери рабочего времени работников, задействованных на сварочном участке, зависят от индивидуальных особенностей, в данном случае от возраста. Это сказывается на издержках предприятия вследствие воздействия на работников ОВПФ при выполнении ими ручной и полуавтоматической электросварки стрел и рукоятей.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Дисперсионный анализ позволил провести исследование статистической значимости различия средних значений количественного признака для разных уровней категориальных факторов и сделать соответствующие выводы. С его помощью можно проводить оценку других рисков, присущих рассматриваемому производству, исследовать влияние различных характеристик производственной среды на степень вредности, травмоопасности, оценить экономические показатели предприятия. Учет и анализ в наиболее полном объеме составляющих затрат и ущерба дают возможность обоснованно сформировать план финансирования мероприятий, благодаря которому можно при минимальных затратах получить наибольший эффект от внедрения мероприятий по охране труда, а также дать наиболее объективную оценку влияния уровня безопасности труда на экономические показатели организации [5].

С экономической точки зрения целесообразно принимать все возможные меры для улучшения условий труда, предотвращения несчастных случаев, поскольку исполнение предприятиями обязанностей по выплате страховых взносов и

компенсаций в связи с утратой работоспособности из-за несчастных случаев существенно влияет на экономические показатели. Принято считать, что размер потерь до 10 % от общего рабочего времени является нормальной ситуацией, а в некоторых случаях (в зависимости от конкретного вида деятельности предприятия и должности сотрудника) потери рабочего времени могут составлять и больший процент, являющийся нормой. Однако в большинстве ситуаций показатели свыше означенных указывают на наличие определенных технологических, технических, организационных и кадровых проблем. Если же объем потерь доходит до уровня 50 %, то ситуация может стать критической. Таким образом, анализ потерь рабочего времени следует вести на научной основе, используя методы системного и дисперсионного анализа. Как показывают расчеты, издержки предприятия от отсутствия одного сварщика по причине временной нетрудоспособности (включая упущенную выгоду по выручке, издержки по поиску и замене его другим работником, издержки в период адаптации основного работника, приступившего к работе после излечения) могут составить до 500 и более тысяч рублей в месяц.

Средством устранения негативных факторов производственной среды может стать проведение различных организационно-технических мероприятий по снижению уровня травматизма и профзаболеваемости. В соответствии с действующим законодательством на каждом предприятии в первую очередь нужно создать систему управления охраной труда, при которой, как правило, устанавливается политика в соответствующей области и формируются цели работодателя. В этой системе должны быть предусмотрены процедуры организации и оценки условий труда, управления профессиональными рисками, наблюдения за состоянием здоровья работников, обучения персонала безопасным приемам труда, а также обеспечение сотрудников средствами индивидуальной и коллективной защиты, установление режимов труда и отдыха.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Дисперсионный анализ можно применять и для решения других задач по установлению и оценке влияния факторов на результирующий признак вредности, опасности, а также выявлению наиболее значимых из них. Интегрирующим показателем при этом могут быть экономические показатели затрат на обеспечение безопасных условий труда и компенсационные выплаты. Полученные результаты можно использовать для принятия обоснованных решений по улучшению условий труда, проведению организационно-технических мероприятий, направленных на снижение профзаболеваемости, оптимизацию издержек при создании и поддержании на требуемом уровне безопасных условий труда.

## ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 12.0.003-2015. Система стандартов по безопасности труда. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация. М.: Стандартинформ, 2016. 16 с.
2. Руководство Р 2.2.2006-05. Гигиеническая оценка факторов рабочей среды и трудового процесса. Критерии и классификация условий труда // *Бюллетень нормативных и методических документов Госсанэпиднадзора*. 2005. № 3 (21), 142 с.
3. Шеффе Г. Дисперсионный анализ. М.: Наука, 1980. 512 с.
4. Статистические методы анализа данных: учебник / под общ. ред. Л.И. Ниворожкиной. М.: РИОР: ИНФРА-М, 2017. 331 с.
5. Сердюк В.С., Кузнецов В.П., Бакико Е.В. Мотивация предотвращения несчастных случаев на производстве и профзаболеваний: учебное текстовое

электронное издание. Омск: Омский государственный технический университет, 2016. 90 с. URL: <https://www.iprbookshop.ru/60879.html> (дата обращения: 25.09.2021).

**Для цитирования:** Пузырев Н.М., Мартынов Д.В., Барбашинова Н.Б., Емцев А.С. Оценка опасных и вредных производственных факторов в эргатических системах методом дисперсионного анализа // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2021. № 4 (12). С. 91–97.

## **ASSESSMENT OF HAZARDOUS AND HARMFUL PRODUCTION FACTORS IN ERGATIC SYSTEMS BY THE METHOD OF DISPERSION ANALYSIS**

N.M. PUZYREV, Cand. Sc., D.V. MARTYNOV, Cand. Sc.,  
N.B. BARBASHINOVA, Lecturer, A.S. YEMTSEV, postgraduate

Tver State Technical University, 22, Af. Nikitin emb.,  
170026, Tver, Russian Federation, e-mail: [puzyrevfdpo@rambler.ru](mailto:puzyrevfdpo@rambler.ru)

The characteristics of hazardous and harmful production factors in such an ergatic system as electric welding production, their harmful effects on personnel are given. Based on the analysis of variance, a relationship is established between the impact of these factors on personnel and the partial loss of their working capacity, taking into account individual characteristics. A method for solving problems of assessing the level of safety at work using the methods of analysis of variance is proposed, showing that the improvement of the economic performance of an enterprise depends on the creation of safer working conditions, leading to a decrease in losses of working time.

*Keywords:* system analysis, ergatic system, industrial safety, hazardous production factor, harmful production factor, analysis of variance.

### **REFERENCES**

1. GOST 12.0.003-2015. Sistema standartov po bezopasnosti truda. Opasnyye i vrednyye proizvodstvennyye faktory. Klassifikatsiya. Moscow: Standartinform, 2016. 16 p.
2. Rukovodstvo R 2.2.2006-05. Gigiyenicheskaya otsenka faktorov rabochey sredey i trudovogo protsessa. Kriterii i klassifikatsiya usloviy truda. *Byulleten normativnykh i metodicheskikh dokumentov Gossanepidnadzora*. 2005. № 3 (21), 142 p. (In Russian).
3. Sheffe G. Dispersionnyy analiz [Analysis of variance]. Moscow: Nauka, 1980. 512 p.
4. Statisticheskiye metody analiza dannykh: uchebnyk [Statistical methods of data analysis: a textbook] / pod obshch. red. L.I. Nivorozhkinoy. Moscow: RIOR: INFRA-M, 2017. 331 p.
5. Serdyuk V.S., Kuznetsov V.P., Bakiko Ye.V. Motivatsiya predotvrashcheniya neschastnykh sluchayev na proizvodstve i profzabolevaniy: uchebnoye tekstovoye elektronnoye izdaniye [Motivation for the prevention of industrial accidents and occupational diseases: educational text electronic edition]. Omsk: Omskiy gosudarstvennyy tekhnicheskyy universitet, 2016. 90 p. URL: <https://www.iprbookshop.ru/60879.html> (date accessed: 25.09.2021).

Поступила в редакцию/received: 21.09.2021; после рецензирования/revised: 29.09.2021;  
принята/accepted: 05.10.2021

**ВЕСТНИК ТВЕРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО  
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА. СЕРИЯ «ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ».  
ОФОРМЛЕНИЕ СТАТЕЙ. ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ**

Редакция журнала просит авторов, направляющих свои статьи для опубликования, руководствоваться изложенными ниже правилами и соблюдать нормы действующего законодательства о защите авторских прав (глава 70 «Авторское право» Гражданского кодекса Российской Федерации, часть IV), придерживаться общепринятых этических норм в соответствии с Декларацией о публикационной этике и неприемлемых практиках, одобренной решением Бюро Научно-издательского совета РАН от 18 сентября 2012 года.

**Общие положения**

К рассмотрению для опубликования в журнале принимаются статьи, содержащие результаты оригинальных теоретических и экспериментальных научных исследований, не опубликованные ранее и не переданные в редакции других журналов. Статьи должны отвечать тематике основных разделов журнала: «Машиностроение и машиноведение»; «Транспортное, горное и строительное машиностроение»; «Информатика, вычислительная техника и управление».

В список авторов статей включаются только те лица, которые внесли значительный вклад в исследовательскую работу, не более 5 специалистов от одной организации. Участники подготовительных или вспомогательных работ отмечаются в примечаниях к соответствующим разделам основного текста или в разделе благодарностей.

Все принятые к рассмотрению статьи проходят независимое рецензирование и в случае необходимости направляются авторам на исправление, доработку. Решение о публикации принимает редколлегия журнала по результатам рассмотрения окончательного варианта статьи с учетом рекомендаций рецензента.

Необходимо также представить:

рекомендацию организации, в которой статья подготовлена (направление от иностранного учреждения предоставляется в случае, если этого требуют его правила);

экспертное заключение на статью о возможности открытого опубликования (для авторов из Российской Федерации) или авторскую справку (для сотрудников ТвГТУ).

Необходимо заключить лицензионный договор с Тверским государственным техническим университетом о предоставлении права использования произведения. Форма договора представлена на сайте ТвГТУ (<http://www.tstu.ver.ru>) в разделе «Вестник Тверского государственного технического университета».

Материалы статьи, а именно: файл с названием ФИОавтора.docx (указывается фамилия первого автора) и текстом статьи, копия экспертного заключения (ФИОавтора заключение.pdf) и копия лицензионного договора, подписанного со стороны авторов (ФИОавтора договор.pdf), высылаются по адресу электронной почты [vestnik\\_tstu\\_tekh@mail.ru](mailto:vestnik_tstu_tekh@mail.ru).

Плата за публикацию статьи с авторов не взимается.

**Оформление текста рукописи**

Текст статьи должен быть набран в редакторе Microsoft Word. Параметры страницы: поля по 25 мм с каждой стороны. Шрифт: Times New Roman, кегль 12 для всего текста. Междустрочный интервал одинарный. Абзацный отступ 1,25 устанавливается для всего текста. Отступ снимается для ориентированных «по центру» заголовка и подзаголовков, для таблиц и рисунков.

Единицы физических величин должны быть приведены в Международной системе единиц (СИ).

Все употребляемые автором обозначения, за исключением общепринятых констант  $e$ ,  $\pi$  и т.п., и аббревиатуры должны быть расшифрованы при их первом написании в тексте.

Для набора формул следует использовать встроенный редактор. Формулы, вставленные как изображение, не допускаются!

Все таблицы и рисунки должны быть пронумерованы и иметь название, на них обязательно должна быть ссылка в тексте статьи. Размеры шрифтов на рисунках и графиках не должны значительно отличаться от размера шрифта основного текста.

Иллюстративный материал (фотографии, схемы и т.п.) необходимо сохранять в формате \*.tif, \*.jpg с разрешением не ниже 300 dpi (предпочтительно 600 dpi).

Таблицы должны быть составлены лаконично, однотипные таблицы строятся одинаково. Цифровые данные следует округлять в соответствии с точностью эксперимента. Сведения в таблицах и на рисунках не должны повторяться. Таблицы, представленные в виде изображений или в формате PDF, не принимаются.

Рукопись статьи в указанной ниже последовательности должна включать: индекс УДК, название, фамилию и инициалы каждого автора с указанием ученой степени, название организации по месту работы каждого автора с указанием почтового и электронного адресов, аннотацию объемом 500–700 знаков и 5–10 ключевых слов; основное содержание статьи (текст, рисунки, таблицы, формулы), список используемой литературы.

Название статьи, фамилии и инициалы авторов, названия организаций и их адреса, аннотация с ключевыми словами, список используемой литературы должны быть переведены на английский язык.

Статья должна быть структурирована, т.е. разбита на разделы, например: «Введение», «Материалы и методика эксперимента», «Полученные результаты и их обсуждение», «Заключение», «Литература».

Литература к статье обязательна и должна содержать все цитируемые и упоминаемые в тексте работы. Номер ссылки в тексте заключается в квадратные скобки, в списке литературы он нумеруется арабскими цифрами с точкой без скобок.

При цитировании следует ссылаться преимущественно на статьи из журналов, включенных в перечень научных изданий, которые рекомендованы ВАК РФ для опубликования трудов соискателей ученых степеней. Не рекомендуется ссылаться на рекламные буклеты, тезисы докладов и другие нерцензируемые издания. Нельзя ссылаться на неопубликованные работы (отчеты по НИОКР, служебные документы, материалы с ограниченным грифом).

В списке литературы следует указывать не менее 15–20 первоисточников, доля ссылок на собственные работы автора (авторов) не должна превышать 30 %, публикации последних 5–10 лет должны составлять не менее 30 %.

Основной список литературы необходимо дублировать на английском языке в разделе References следующим образом: фамилии и инициалы авторов латинским шрифтом, транслитерация латинскими буквами русского названия публикации и перевод названия на английский язык, транслитерация названия российского журнала, год издания, том, номер, страницы.

Представленные статьи могут быть отклонены редколлегией по причинам несоблюдения настоящих правил, несоответствия тематической направленности журнала и современному уровню исследований, а также при небрежном оформлении.

**ВЕСТНИК  
ТВЕРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО  
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА**

**Серия «Технические науки»**

**Научный рецензируемый журнал  
№ 4 (12), 2021**

**Print ISSN 2658-5030**

Редактор С.В. Борисов  
Корректор Я.А. Петрова

---

Подписано в печать 24.12.2021

Дата выхода в свет 30.12.2021

Формат 60 x 84/8

Физ. печ. л. 12,5

Тираж 500 экз.

Усл. печ. л. 11,625

Цена свободная

Заказ № 223

Бумага писчая

Уч.-изд. л. 10,875

С – 100

---

Редакционно-издательский центр  
Тверского государственного технического университета  
170026, Тверь, наб. Афанасия Никитина, 22  
Отпечатано в ООО «Наукоемкие технологии»  
Центр инженерной печати  
170024, Тверь, ул. Академическая, д. 14