

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
№ 2 (10), 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

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>Болотов А.Н., Новиков В.В., Новикова О.О.</i> Влияние структуры минералокерамического абразивного материала на эксплуатационные параметры и морфологию обрабатываемой поверхности.....	5
<i>Измайлов В.В., Новоселова М.В.</i> Электроконтактные свойства материала, содержащего тугоплавкие компоненты. Композит медь – карбид хрома	15
<i>Измайлов В.В., Новоселова М.В.</i> Об электроэрозионном изнашивании и энергетическом балансе в режиме электроимпульсного разряда	21
<i>Мигранов А.М., Мигранов М.Ш., Нигматуллин Р.Г., Шехтман С.Р.</i> Мониторинг состояния узлов трения по анализу смазочных материалов.....	29
<i>Архаров А.П.</i> Измерение параметров паза шарнирной вилки.....	39
<i>Ильяшенко С.Е., Афанасьева Л.Е.</i> Контроль кристаллографической текстуры стального листового проката с помощью пленочных магнитоэластов и магнитной суспензии.....	45

ТРАНСПОРТНОЕ, ГОРНОЕ И СТРОИТЕЛЬНОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

<i>Яблонев А.Л., Жуков Н.М.</i> Расчет момента сопротивления фрезерованию торфяной залежи при попадании фрезы на пень и определение активной ширины рабочего органа.....	51
<i>Дьяченко В.П.</i> Обобщенные зависимости эксплуатационных параметров конвейера от цилиндрической жесткости грузонесущей ленты.....	62

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

<i>Илясов Л.В.</i> Автоматический трансфузионный анализатор концентрации водорода в многокомпонентных газовых средах	70
<i>Ахремчик О.Л., Базулев И.И.</i> Исследование процесса квитиования при макетировании систем звуковой сигнализации.....	77
<i>Илясов Л.В., Жигулин С.Ю., Иванова Н.И.</i> Экспериментальное исследование теплового режима камеры для сжатия газов компьютерного эффузионного анализатора плотности газов с убывающим давлением истечения	84
<i>Нестеров Я.А., Семенов Н.А.</i> Применение технологии блокчейн в промышленности как части Индустрии 4.0.....	93
Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». Оформление статей. Правила для авторов.....	99

CONTENTS

MECHANICAL ENGINEERING AND MACHINE SCIENCE

<i>Bolotov A.N., Novikov V.V., Novikova O.O.</i> Influence of the structure of mineral-ceramic abrasive material on the operational parameters and morphology of the treated surface.....	5
<i>Izmailov V.V., Novoselova M.V.</i> Electrical contact properties of the material containing refractory components. Composite copper – chromium carbide.....	15
<i>Izmailov V.V., Novoselova M.V.</i> On electric erosion wear and energy balance of electric pulse discharge mode.....	21
<i>Migranov A.M., Migranov M.Sh., Nigmatullin R.G., Shekhtman S.R.</i> Monitoring of the state of friction units based on the analysis of lubricants.....	29
<i>Arkharov A.P.</i> Hinged fork groove parameters measuring.....	39
<i>Ilyashenko S.E., Afanasieva L.E.</i> Control of the crystallographic texture of steel sheets using film magnetoelasts and magnetic suspension.....	45

TRANSPORT, MINING AND CONSTRUCTION MACHINERY

<i>Yablonev A.L., Zhukov N.M.</i> Calculation of the moment of resistance to milling a peat layout when the miller hits a stump and determination of the active width of the working body.....	51
<i>Dyachenko V.P.</i> Generalized dependences of the operational parameters of the conveyor on the cylindrical stiffness of the load-bearing belt.....	62

INFORMATICS, COMPUTER FACILITIES AND MANAGEMENT

<i>Ilyasov L.V.</i> Automatic transfusion analyzer of hydrogen concentration in multicomponent gas medias.....	70
<i>Akhremchik O.L., Basulev I.I.</i> Acknowledgement process research under the physical modelling of sound signaling systems.....	77
<i>Ilyasov L.V., Zhigulin S.Yu., Ivanova N.I.</i> Experimental research of the gas compression chamber thermal regime of the computer effusion decreasing discharge pressure gas density analyzer.....	84
<i>Nesterov Ya.A., Semenov N.A.</i> Application of blockchain technology in industry as part of Industry 4.0.....	93
Instructions for authors of the journal «Bulletin of the Tver State Technical University». Series «Engineering». Manuscript requirements.....	99

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

УДК 621.892

ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРЫ МИНЕРАЛОКЕРАМИЧЕСКОГО АБРАЗИВНОГО МАТЕРИАЛА НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ПАРАМЕТРЫ И МОРФОЛОГИЮ ОБРАБАТЫВАЕМОЙ ПОВЕРХНОСТИ

А.Н. БОЛОТОВ, д-р техн. наук, В.В. НОВИКОВ, канд. техн. наук,
О.О. НОВИКОВА, канд. техн. наук

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

© Болотов А.Н., Новиков В.В., Новикова О.О., 2021

В результате проведенных исследований оценено влияние структурных компонентов нового алмазосодержащего минералокерамического материала на его рабочие свойства. Установлено, что объемная режущая способность алмазосодержащего инструмента в процессе абразивного изнашивания стабильна, возрастает нелинейно с увеличением зернистости алмазов и незначительно снижается при увеличении их концентрации. Морфология рабочей поверхности абразивного инструмента в процессе эксплуатации практически не изменяется. Шероховатость обрабатываемой поверхности возрастает при использовании алмазов более крупных фракций. При увеличении концентрации алмазов в инструменте из минералокерамического материала параметр профиля поверхности R_a обрабатываемой детали снижается нелинейно. Предложена эмпирическая зависимость параметра R_a обрабатываемой поверхности. Показано, что абразивные инструменты, изготовленные из алмазосодержащего минералокерамического материала, в процессе эксплуатации реализуют режим самозатачивания.

Ключевые слова: минералокерамические материалы, алмазосодержащие инструменты, трение, изнашивание, шероховатость.

DOI: 10.46573/2658-5030-2021-5-14

ВВЕДЕНИЕ

В современном машиностроении широкое применение нашли режущие инструменты из минералокерамических композиционных материалов [1–3]. Высокие твердость, тепло- и износостойкость, стабильные режущие свойства позволяют успешно использовать инструменты из минералокерамических сплавов для точения и фрезерования широкого класса материалов. Имеющиеся недостатки минералокерамики, такие как низкая прочность на изгиб, хрупкость, слабое сопротивление циклическому изменению температуры, обуславливают необходимость разработки новых эффективных минералокерамических материалов [4–5].

Нами проведены исследования, направленные на получение нового минералокерамического материала, предназначенного для изготовления абразивного инструмента. Исходными материалами являются микродисперсная алюминиевая пудра и синтетические алмазы, металлизированные медью. Путем прессования, спекания и

микродугового оксидирования [6–8] рабочей поверхности заготовки получен композиционный материал, представляющий собой тугоплавкую оксидную матрицу, в которую внедрены частицы алмаза. Предварительные испытания показали хорошие абразивные свойства разработанного материала [7, 9]. Создание абразивного инструмента из алмазосодержащего композиционного минералокерамического материала с заранее заданными эксплуатационными параметрами: высокой производительностью шлифования и необходимым качеством обрабатываемой поверхности – требует дополнительного изучения [10–12].

На режущую способность и качество обрабатываемой поверхности при абразивной обработке, помимо эксплуатационных параметров, влияет большое число факторов, но основной вклад вносят зернистость и концентрация алмазов, сочетание физико-механических свойств алмазов и матрицы [12, 13].

Цель исследования – установить влияние структурных компонентов нового абразивного минералокерамического композиционного материала на его рабочие свойства: режущую способность, характеристики шероховатости рельефа инструмента и качество обрабатываемой поверхности.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Абразивные свойства разработанного минералокерамического композиционного материала оценивались на машине трения МТ-2 [11], узел трения которой реализован по схеме палец – кольцо. Анализ структуры его режущей поверхности и морфологии обрабатываемой поверхности контрообразца проводился с помощью металлографического микроскопа и стандартных методов профилометрии по ГОСТ 19300-86 [14].

Для сравнительного анализа аналогичные данные получены для традиционно применяемых инструментальных алмазосодержащих материалов с металлической (М1) и органической бакелитовой (Б1) матрицами. В качестве смазки использована техническая вода. Контрообразцы изготовлены из керамики $\text{BaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ (твердость 16 ГПа). Давление на контакте 1 МПа, линейная скорость скольжения 30 м/с.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Влияние структуры инструмента из минералокерамического материала на его работоспособность. Результаты исследования объемной режущей способности керамического контрообразца представлены на рис. 1. Режущие свойства абразивных материалов коррелируют с твердостью материала матрицы. Материал с керамической матрицей показал лучшие характеристики, что объясняется наиболее высоким сопротивлением матрицы абразивному воздействию частиц износа (рис. 1а, б). Нелинейное возрастание режущей способности абразивных материалов с увеличением зернистости алмазов не зависит от вида матрицы и характерно для всех испытуемых алмазосодержащих материалов (рис. 1а). При возрастании зернистости до 100/80 мкм превалирующим фактором является увеличение вылета режущих зерен над поверхностью матрицы и, соответственно, увеличение объема изнашиваемого материала. Дальнейший рост радиусов алмазных зерен ведет к сглаживанию их режущих углов, скруглению вершин, и повышению объемной режущей способности практически не наблюдается.

Увеличение концентрации алмазов в абразивном материале несколько снижает его объемную режущую способность (рис. 1б), что связано с трудностями удаления частиц износа из зоны трения.

Алмазосодержащий материал с матрицей М1 показал наиболее сопоставимую с минералокерамикой величину режущей способности, однако для поддержания ее на высоком уровне инструменту была необходима периодическая правка, которая удаляет его «засаленность» продуктами износа. Установлено, что образцы алмазосодержащих материалов с матрицами М1 и Б1 снижают работоспособность примерно в 2,6...6,7 раза в течение 20 мин работы. У минералокерамического материала она практически не изменяется (уменьшается за аналогичное время всего на 4...6 %). Стабильно высокая режущая способность позволяет предположить, что абразивные инструменты из минералокерамики функционируют в режиме самозатачивания.

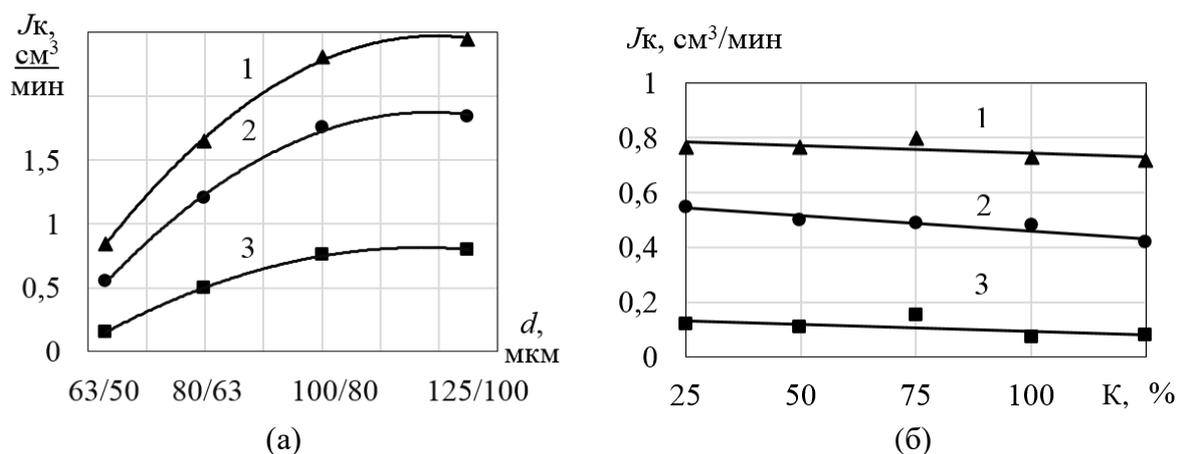


Рис. 1. Влияние зернистости (а) и концентрации алмазов (б) на объемную режущую способность алмазосодержащих материалов: 1 – керамическая матрица; 2 – матрица М1; 3 – матрица Б1

Изменение морфологии рабочей поверхности минералокерамического абразивного инструмента в процессе эксплуатации. Сложная морфология режущей поверхности абразивного алмазосодержащего минералокерамического инструмента является следствием трехмерной внутренней структуры, представляющей собой тугоплавкую керамическую матрицу из оксидов алюминия, в которой равномерно распределены металлизированные медью зерна алмазов (рис. 2). На рис. 2а, б приведены изображения поверхностей износа образцов с различной массовой концентрацией алмазов К. На этих изображениях хорошо видны алмазы, встроенные в матрицу на различной глубине. После фрикционных испытаний на керамической матрице отсутствуют следы износа, алмазы значительно выступают над поверхностью матрицы, их режущие кромки сохраняют остроту.

Сравнение морфологии изношенных поверхностей минералокерамического материала и образца с матрицей М1 (рис. 3) показывает значительные преимущества первого. Поверхность показавшего достаточно высокую объемную режущую способность алмазосодержащего материала с матрицей М1 имеет выраженные следы пластического деформирования матрицы, алмазные зерна «засалены» частицами износа.

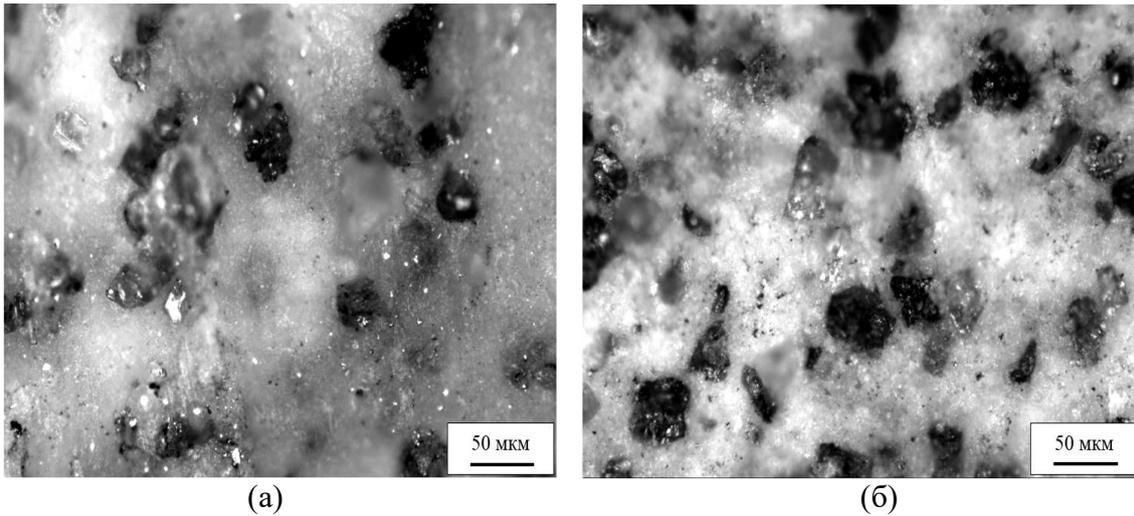


Рис. 2. Структура поверхности трения образцов из минералокерамики после испытаний: $d = 63/50$ мкм, $K = 75\%$ (а); $d = 63/50$ мкм, $K = 100\%$ (б)

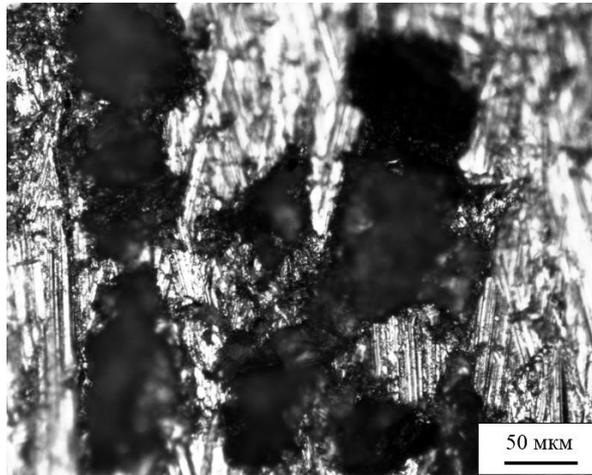


Рис. 3. Структура поверхности трения образцов с металлической матрицей после испытаний: $d = 80/63$ мкм, $K = 75\%$

Анализ профилограмм показывает, что микрогеометрия режущей поверхности минералокерамического инструмента практически не изменяется в процессе эксплуатации (рис. 4а, б). Высота и шаг микронеровностей изменились незначительно, выглаживание режущих вершин минимально. Геометрический размер периодически повторяющихся неровностей (средний шаг микронеровностей) соответствует среднему размеру зерен алмаза в составе образца. Отсутствует отклонение от цилиндричности инструмента: поверхность образца сохраняет правильную геометрическую форму.

Для сравнения приведена профилограмма алмазосодержащего материала с матрицей Б1, полученная после испытаний при аналогичных режимах без дополнительной правки инструмента (рис. 4в). Исходные профили поверхностей образцов из минералокерамики и Б1 имели практически одинаковые параметры микрогеометрии, но после трибовоздействия они существенно различаются (рис. 4б, в). На профилограмме образца Б1 виден резко выраженный рельеф с глубокими

впадинами, оставленными, вероятно, удаленными из поверхности алмазами вместе с частью матрицы. Имеются хаотично расположенные горизонтальные участки, образованные выглаживанием мягкой поверхности матрицы. На рабочей поверхности абразивного инструмента Б1 после фрикционного воздействия сформировано заметное отклонение от цилиндричности инструмента (бочкообразность).

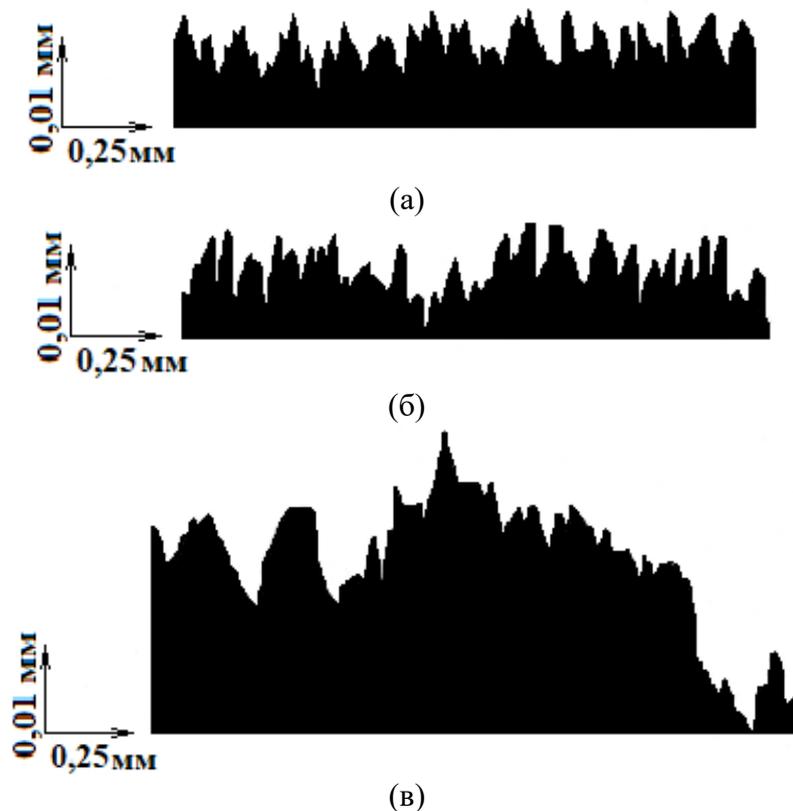


Рис. 4. Профилограммы рабочих поверхностей алмазосодержащих инструментов с матрицами различных типов: оксидная керамика до испытаний (а); оксидная керамика после испытаний (б); матрица Б1 после испытаний (в)

Стабильность профиля режущей поверхности минералокерамического инструмента, определяющая его высокую работоспособность, является несомненным преимуществом по сравнению с традиционными материалами. Высокая твердость и антифрикционные свойства этих составляющих [1–3, 15, 16] обеспечивают сопротивление к абразивному износу рабочей поверхности инструмента. Корундовая матрица, обладая высоким алмазодержанием, обеспечивает значительный вылет режущих зерен над материалом связки и не позволяет алмазам удаляться под действием сил трения до полного износа. При этом уменьшается площадь контакта матрицы и обрабатываемого материала, сохраняется стабильным профиль инструмента. Учитывая эти факты и близкие механические свойства структурных составляющих композита, можно предположить, что изношенные алмазы удаляются с режущей поверхности вместе с частью окружающей их матрицы, обнажая новые зерна, реализуя режим самозатачивания. Высокая теплопроводность алюминиевой подложки обеспечивает хороший отвод тепла из зоны трения, препятствует незапланированной графитизации алмазных зерен и снижению их режущих свойств от воздействия высокой температуры, вызванной фрикционным разогревом.

Влияние характеристик минералокерамического абразивного материала и режимов шлифования на морфологию обрабатываемой поверхности. В результате проведенных сравнительных испытаний было установлено, что шероховатость контробразца не коррелирует обратно пропорционально с твердостью материала матрицы (таблица). Наиболее твердая минералокерамическая матрица обеспечивает средние значения параметра *Ra* между более мягкими матрицами М1 и Б1.

Влияние характеристик алмазосодержащих абразивных материалов на шероховатость обрабатываемой поверхности

Материал матрицы	Зернистость, мкм	Параметры шероховатости <i>Ra</i> , мкм, при концентрации алмаза <i>K</i> , %		
		50	100	125
Оксидная керамика	100/80	1,05...0,90	0,85...0,70	0,72...0,60
	80/63	0,72...0,64	0,62...0,50	0,53...0,47
	63/40	0,56...0,44	0,48...0,40	0,40...0,32
М1	100/80	1,30...1,10	1,10...0,95	0,90...0,75
	80/63	0,95...0,85	0,80...0,70	0,65...0,55
	63/40	0,72...0,60	0,60...0,50	0,50...0,42
Б1	100/80	0,70...0,58	0,63...0,50	0,40...0,32
	80/63	0,52...0,40	0,40...0,32	0,32...0,25
	63/40	0,42...0,30	0,32...0,25	0,25...0,20

Как видно из представленных данных, существенное влияние на формирование морфологии обрабатываемой поверхности керамического контробразца оказывает зернистость алмазов: шероховатость возрастает при использовании алмазов более крупных фракций (независимо от материала матрицы). Влияние концентрации алмазов в инструменте из минералокерамического материала более сложно. При изменении ее в диапазонах 50...75 и 100...125 % параметр *Ra* достаточно стабилен, в диапазоне 75...100 % и при неизменных других факторах шероховатость поверхности обрабатываемой детали плавно понижается.

Режимы шлифования оказывают меньшее влияние на морфологию поверхности детали, обрабатываемой минералокерамическим инструментом, по сравнению с характеристиками самого инструмента. Изменение силы нормального давления в зоне контакта абразивного круга и детали практически не отражается на параметрах шероховатости контробразца.

Испытания показали, что с увеличением линейной скорости скольжения (скорости вращения) абразивного минералокерамического инструмента шероховатость поверхности контробразца снижается. Основную роль в данном случае играет локальное изменение физико-механических свойств материала контробразца вследствие фрикционного разогрева поверхностей в зоне контакта. Для существенного

уменьшения шероховатости скорость должна достигать очень высоких значений (шероховатость снижается вдвое при скорости скольжения более 100 м/с). Однако из конструктивных соображений эксплуатация алмазосодержащих композиционных материалов при скоростях свыше 30 м/с нецелесообразна, так как приводит к их разрушению. В рекомендованном диапазоне скоростей и при хорошем отводе тепла из зоны трения, обеспечиваемом алюминиевой подложкой минералокерамического инструмента и смазочной жидкостью, шероховатость контробразца практически не зависит от скорости абразивной обработки.

В результате обработки результатов испытаний получена эмпирическая зависимость параметра профиля поверхности Ra обрабатываемой детали:

$$Ra = 8,81 \cdot 10^{-19} \cdot d^4 \cdot H_M^{0,67} \cdot H_K^{0,54} \cdot \left(\frac{10^{-4} K_V^2 + 1,25}{10^{-4} K_V^2 + 1} \right),$$

где d – зернистость алмазов в минералокерамическом материале, обозначенная численными значениями нижней фракции, мкм; H_M и H_K – микротвердость материалов матрицы и контробразца соответственно, Па; K_V – объемная концентрация алмазов, %.

Расчетные значения шероховатости коррелируют с экспериментальными значениями для d от 20 до 200 мкм и K_V от 10 до 30 %, с погрешностью, не превышающей 15 %.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Благодаря сочетанию уникальных по физико-механическим свойствам материалов – алмаза и корундовой матрицы, получен новый алмазосодержащий минералокерамический материал, обладающий высокими триботехническими параметрами. Выполненные из него абразивные инструменты характеризуются стабильно высокой объемной режущей способностью, хорошим алмазодержанием, теплостойкостью, в процессе эксплуатации реализуют режим самозатачивания.

Установлена связь между рабочими и структурными составляющими алмазосодержащих абразивных материалов, твердостью матрицы, характеристиками шероховатости рельефа обрабатываемой поверхности.

Результаты исследований, полученные при детальном изучении связи между зернистостью, концентрацией алмазов, морфологией алмазосодержащего минералокерамического инструмента и морфологией обрабатываемой поверхности, будут использованы при проектировании новых абразивных материалов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Kumar G.B.V. Rao C.S.P., Selvaraj N., Bhagyashekar M.S. Studies on Al6061-SiC and Al7075-Al2O3 metal matrix composites // *Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering*. 2010. V. 9. № 1. P. 43–55.
2. Orlova L.A., Chainikova A.S., Popovich N.V., Lebedeva Y.E. Composites based on aluminum-silicate glass ceramic with discrete fillers // *Glass and Ceramics*. 2013. V. 70. № 3–4. P. 149–154.
3. Sweet G.A., Brochu M., Hexemer R.L., Donaldson I.W., Bishop D.P. Consolidation of aluminum-based metal matrix composites via spark plasma sintering // *Materials Science and Engineering: A*. 2015. V. 648. P. 123–133.

4. Попов А.И., Зейдан М.Н. Повышение работоспособности режущих пластин из минералокерамики ионно-вакуумной обработкой // *Металлообработка*. 2006. № 4. С. 16–19.
5. Jessen T., Ustundag E. (ed.). 24th Annual Conference on Composites, Advanced Ceramics, Materials, and Structures-A. John Wiley & Sons, 2009. V. 238. 759 p.
6. Болотов А.Н., Новиков В.В., Новикова О.О. Формирование матрицы алмазосодержащего композиционного керамического инструментального материала // *Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел, деталей технологического и энергетического оборудования*. 2019. № 12. С. 80–87.
7. Болотов А.Н., Новиков В.В., Новикова О.О. Синтез абразивных инструментов с алмазным керамическим покрытием для прецизионной микрообработки сверхтвердых материалов // *Все материалы. Энциклопедический справочник*. 2020. № 4. С. 30–37.
8. Болотов А.Н., Новикова О.О., Новиков В.В. Исследование режимов формирования алмазосодержащего керамического абразивного материала методом микродугового оксидирования // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2020. № 2 (6). С. 5–13.
9. Болотов А.Н., Новиков В.В., Новикова О.О. Минералокерамический композиционный материал: синтез и фрикционные свойства // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. 2020. Т. 22. № 3. С. 59–68.
10. Судник Л.В., Витязь П.А., Ильющенко А.Ф. Алмазосодержащие абразивные нанокompозиты. Минск: Беларуская навука, 2012. 319 с.
11. Болотов А.Н., Новиков В.В., Новикова О.О. Зависимость износа пары трения композиционный алмазосодержащий материал – керамика // *Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел, деталей технологического и энергетического оборудования*. 2017. № 10. С. 153–157.
12. Витязь П.А. Наноалмазы детонационного синтеза: получение и применение: монография. Минск: Беларуская навука, 2013. 381 с.
13. Янюшкин А.С., Лобанов Д.В., Скиба В.Ю., Гартфельдер В.А., Секлетина Л.С. Повышение эффективности алмазного инструмента на металлической связке при шлифовании высокопрочных материалов // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. 2017. № 3 (76). С. 17–27.
14. ГОСТ 19300-86 Средства измерений шероховатости поверхности профильным методом. Профилографы-профилометры контактные. Типы и основные параметры. М.: Изд-во стандартов, 1988. 11 с.
15. Xu H., Yang Z., Li M. K., Shi Y. L., Huang Y., Li H.L. Synthesis and properties of electroless Ni-P-Nanometer Diamond composite coatings // *Surface and Coatings Technology*. 2005. V. 191. № 2–3. P. 161–165.
16. Gubarevich A.V., Usuba S., Kakudate Y., Tanaka A., Odawara O. Diamond powders less than 100 nm in diameter as effective solid lubricants in vacuum // *Japanese Journal of Applied Physics. Part 2: Letters*. 2004. V. 43. № 7A. P. L920.

Для цитирования: Болотов А.Н., Новиков В.В., Новикова О.О. Влияние структуры минералокерамического абразивного материала на эксплуатационные параметры и морфологию обрабатываемой поверхности // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2021. № 2 (10). С. 5–14.

INFLUENCE OF THE STRUCTURE OF MINERAL-CERAMIC ABRASIVE MATERIAL ON THE OPERATIONAL PARAMETERS AND MORPHOLOGY OF THE TREATED SURFACE

A.N. BOLOTOV, Dr. Sc., V.V. NOVIKOV, Cand. Sc.,
O.O. NOVIKOVA, Cand. Sc.

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

As a result of the studies carried out, the influence of the structural components of the new diamond-containing mineral-ceramic material on its working properties was evaluated. The volumetric cutting ability of a diamond-containing tool, which is stable in the process of abrasive wear, increases nonlinearly with an increase in the grain size of diamonds and slightly decreases with an increase in their concentration. The morphology of the working surface of the abrasive tool practically does not change during operation. It has been established that the roughness of the treated surface increases when using diamonds of larger fractions. With an increase in the concentration of diamonds in a tool made of a mineral-ceramic material, the parameter of the surface profile Ra of the workpiece does not decrease linearly. An empirical dependence of the parameter Ra of the treated surface is proposed. It has been established that abrasive tools made of diamond-containing mineral-ceramic material in the process of operation realize the mode of self-sharpening.

Keywords: mineral ceramic materials, diamond-containing tools, friction, wear, roughness.

REFERENCES

1. Kumar G.B.V. Rao C.S.P., Selvaraj N., Bhagyashekar M.S. Studies on Al6061-SiC and Al7075-Al₂O₃ metal matrix composites. *Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering*. 2010. V. 9. No 1, pp. 43–55.
2. Orlova L.A., Chainikova A.S., Popovich N.V., Lebedeva Y.E. Composites based on aluminum-silicate glass ceramic with discrete fillers. *Glass and Ceramics*. 2013. V. 70. No 3–4, pp. 149–154.
3. Sweet G.A., Brochu M., Hexemer R.L., Donaldson I.W., Bishop D.P. Consolidation of aluminum-based metal matrix composites via spark plasma sintering. *Materials Science and Engineering: A*. 2015. V. 648, pp. 123–133.
4. Popov A.I., Mohammad N.Z. Increase of serviceability of cutting plates from mineral ceramics by ionic-vacuum processing. *Metallobrabotka*. 2006. No 4 (34), pp. 16–19. (In Russian).
5. Jessen T., Ustundag E. (ed.). 24th Annual Conference on Composites, Advanced Ceramics, Materials, and Structures-A. John Wiley & Sons, 2009. V. 238. 759 p.
6. Bolotov A.N., Novikov V.V., Novikova O.O. Formation of matrix of almazcontaining composite ceramic instrumental material. *Mekhanika i fizika processov na poverhnosti i v kontakte tverdyh tel i detalej tekhnologicheskogo i ehnergeticheskogo oborudovaniya*. 2019. No 12, pp. 80–87. (In Russian).
7. Bolotov A.N., Novikov V.V., Novikova O.O. Synthesis of diamond ceramic coated abrasive tools for precision micromachining of superhard materials. *Vse materialy. Enciklopedicheskij spravochnik*. 2020. No 4, pp. 30–37. (In Russian).

8. Bolotov A.N., Novikova O.O., Novikov V.V. Research of modes of formation of diamond-containing ceramic abrasive material by the method of microarc oxidation. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki*. 2020. No 2 (6), pp. 5–13. (In Russian).

9. Bolotov A.N., Novikov V.V., Novikova O.O. Mineral ceramic composite material: synthesis and friction behavior. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty)*. 2020. V. 22. No 3, pp. 59–68. (In Russian).

10. Sudnik L.V., Vityaz P.A., Ilushchenko A.F. Almazosoderzhashchie abrazivnye nanokompozity [Diamond-containing abrasive nanocomposites]. Minsk: Belaruskaya navuka, 2012. 319 p. (In Russian).

11. Bolotov A.N., Novikov V.V., Novikova O.O. Dependence of wear of a friction pair of a composite diamond-containing material – ceramics. *Mekhanika i fizika processov na poverhnosti i v kontakte tverdyh tel i detalej tekhnologicheskogo i ehnergeticheskogo oborudovaniya*. 2017. No 10, pp. 153–157. (In Russian).

12. Vityaz P.A. Nanoalmazny detonatsionny sintez: poluchenie i primeneniye: monografiya [Detonation synthesis nanodiamonds: production and application: monograph]. Minsk: Belaruskaya navuka, 2013. 381 p. (In Russian).

13. Yanyushkin A.S., Lobanov D.V., Skeebe V.Yu., Gartfelder V.A., Sekletina L.S. Enhancing the effectiveness of the diamond metal bond instrument when grinding high-strength materials. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty)*. 2017. No 3 (76), pp. 17–27. (In Russian).

14. GOST 19300-86 Sredstva izmerenij sherohovatosti poverhnosti profilnym metodom. Profilografy-profilometry kontaktnye. Tipy i osnovnye parametry [Means for measuring surface roughness by the profile method. Contact profilometers-profilometers. Types and basic parameters]. Moscow: Izd-vo standartov, 1988. 11 p. (In Russian).

15. Xu H., Yang Z., Li M. K., Shi Y. L., Huang Y., Li H.L. Synthesis and properties of electroless Ni-P-Nanometer Diamond composite coatings. *Surface and Coatings Technology*. 2005. V. 19. No 2–3, pp. 161–165.

16. Gubarevich A.V., Usuba S., Kakudate Y., Tanaka A., Odawara O. Diamond powders less than 100 nm in diameter as effective solid lubricants in vacuum. *Japanese Journal of Applied Physics. Part 2: Letters*. 2004. V. 43. No 7A. P. L920.

Поступила в редакцию/received: 03.01.2021; после рецензирования/revised: 05.03.2021;
принята/accepted: 09.03.2021

ЭЛЕКТРОКОНТАКТНЫЕ СВОЙСТВА МАТЕРИАЛА, СОДЕРЖАЩЕГО ТУГОПЛАВКИЕ КОМПОНЕНТЫ. КОМПОЗИТ МЕДЬ – КАРБИД ХРОМА

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

Приведены результаты исследования электроконтактных характеристик композиционного порошкового материала на медной основе с различным содержанием карбида хрома. Удельное электросопротивление, твердость и электроэрозионный износ исследованных образцов представлены в абсолютных величинах и в сравнении с аналогичными характеристиками эталонного материала – электротехнической меди. Исследовано влияние температуры спекания карбидосодержащего композиционного материала на его электроконтактные свойства, а также зависимость электроэрозионного износа от полярности образца (образец – анод и образец – катод).

Ключевые слова: композиционный материал, медь, карбид хрома, электропроводность, электроэрозионный износ, температура спекания.

DOI: 10.46573/2658-5030-2021-15-20

ВВЕДЕНИЕ

Медь и материалы на ее основе по-прежнему широко используются в качестве электроконтактных материалов ввиду удачного сочетания целого ряда свойств. Однако возможности повышения эксплуатационных и, в частности, электроконтактных характеристик таких материалов, разумеется, не исчерпаны. Одно из направлений такого совершенствования электроконтактных материалов – разработка композиционных материалов на медной основе с различными функциональными наполнителями, получаемых методами порошковой металлургии. Для повышения электроконтактных свойств (электроэрозионной и механической износостойкости, механической прочности) в композиционный материал вводят тугоплавкие компоненты в виде чистых металлов или их химических соединений (карбидов, боридов, силицидов), углерод, графит [1–7].

В данной статье представлены результаты сравнительных испытаний на электроэрозионную износостойкость композиционного порошкового медного материала с различным содержанием карбида хрома Cr_3C_2 . Целью является изучение влияния состава и технологических режимов изготовления образцов на их износостойкость в режиме электроэрозионного изнашивания. За эталон электроконтактного материала в сравнительных испытаниях принята электротехническая медь марки М1. Данная работа является продолжением исследований влияния функциональных наполнителей на механические и электрические свойства электроконтактных материалов на основе меди [1, 3, 7].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследуемые образцы композиционного материала получены прессованием смеси порошков с массовым содержанием карбидов хрома 2, 5 и 10 %, остальное – медь. Физико-механические свойства компонентов приведены в табл. 1. Компакти-

рование заготовок образцов выполнялось 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 температурах 850, 900, 950 и 1 000 °C (± 10 °C). Плотность образцов составляет 8,6...8,8 г/см³.

Таблица 1. Характеристики порошковых материалов

Характеристика	Материал	
	Cu	Cr ₃ C ₂
Плотность, г/см ³	8,92	6,68 [8]
Микротвердость, ГПа	0,055	10,4...20,2 [8]
Температура плавления, °C	1 083	1 895 [8]
Удельное сопротивление, 10^{-8} Ом·м	1,8	75 [8]

Методика и установка для оценки электроэрозионной износостойкости образцов описаны в патенте [9]. Образец из исследуемого материала в виде таблетки диаметром 20 мм и толщиной 3...5 мм контактировал с контрообразцом – вольфрамовым зондом диаметром 1 мм. Вольфрам был выбран в качестве материала зонда по причине его высокой электроэрозионной износостойкости. Частота коммутаций составляла 20 циклов в минуту. Максимальный коммутируемый заряд за одну коммутацию 66 мКл. Для гашения вибрации контактов использовался специальный фрикционный демпфер, гасящий энергию колебаний за счет трения. Нагрузка на контакт вольфрамового зонда с образцом прикладывалась с помощью разновесов и равнялась во всех описанных ниже экспериментах 0,5 Н.

Длительность одного испытания составляла 60 циклов коммутации. После испытаний измеряли линейный износ (глубину кратера на образце) с точностью 0,01 мм. Уменьшение длины вольфрамового зонда было незначительным, поэтому им пренебрегали.

В качестве характеристики износостойкости была принята величина удельной эрозии (отношение объема удаленного материала к величине прошедшего через контакт электрического заряда).

Измерение удельного сопротивления опытных образцов производилось четырех-зондовым методом [10]. Зонды были изготовлены из вольфрама, расстояние между зондами равнялось 1 мм.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Состав материала, физико-механические и электроконтактные характеристики образцов из исследованных материалов представлены в табл. 2. Значения удельного электросопротивления и удельной эрозии приведены с доверительным интервалом, при расчете которого использовался коэффициент Стьюдента для 95%-й доверительной вероятности. Известно, что электроэрозионный износ зависит от полярности электрода, поэтому указаны величины удельной эрозии образцов при их положительной (в качестве анода) и отрицательной (в качестве катода) полярностях.

Для всех образцов при отрицательной полярности (катод) удельная эрозия меньше в 2...3 раза, чем при обратной.

Для исследованных карбидосодержащих материалов величина удельной эрозии (табл. 2) находится в пределах $(1...5) \cdot 10^{-11}$ м³/Кл. Этот результат согласуется с известными из литературы [11] значениями удельной эрозии медных образцов – $10^{-12}...10^{-9}$ м³/Кл.

Таблица 2. Состав и основные характеристики опытных образцов, полученных при различных температурах спекания $T_{сп}$

Характеристика	$T_{сп}, ^\circ\text{C}$	Состав		
		Cu + + 2 % Cr_3C_2	Cu + + 5 % Cr_3C_2	Cu + + 10 % Cr_3C_2
Пористость, %	1 000	12	13	9
	950	14	15	10
	900	13	10	15
	850	12	11	12
Твердость индентирования H при нагрузке на индентор 10 Н, МПа	1 000	424	458	566
	950	379	566	650
	900	424	519	620
	850	566	716	650
Удельное электро-сопротивление ρ , 10^{-8} Ом·м	1 000	2,4±0,6	2,0±0,3	2,2±0,3
	950	3,1±0,4	2,6±0,3	3,1±0,3
	900	2,9±0,3	2,7±0,3	3,2±0,5
	850	2,9±0,8	3,0±0,6	3,8±0,6
Удельная эрозия I , 10^{-11} м ³ /Кл (образец – анод)	1 000	7,5±1,3	7,4±2,5	6,8±0,9
	950	3,8±0,4	3,2±0,6	3,8±0,2
	900	5,2±0,1	3,7±0,2	2,9±0,3
	850	3,4±0,6	4,1±0,2	2,6±0,1
I , 10^{-11} м ³ /Кл (образец – катод)	1 000	2,3±0,3	2,4±0,1	2,0±0,5
	950	1,8±0,4	1,5±0,1	1,3±0,1
	900	2,0±0,1	2,1±0,1	1,7±0,1
	850	1,3±0,2	1,9±0,1	1,2±0,1

Для более наглядного сравнения с эталоном (медью марки М1) результаты испытаний приведены в виде относительных величин в табл. 3, где σ/σ_{Cu} и I/I_{Cu} – относительные электропроводность и удельная эрозия исследованных материалов по сравнению с эталоном. Твердость эталонного образца $H = 716$ МПа. Удельное сопротивление $\rho = 1,8 \cdot 10^{-8}$ Ом·м. Электроэрозионный износ эталонного образца в качестве анода $I = (8,0 \pm 0,2) \cdot 10^{-11}$ м³/Кл, в качестве катода $I = (2,3 \pm 0,8) \cdot 10^{-11}$ м³/Кл.

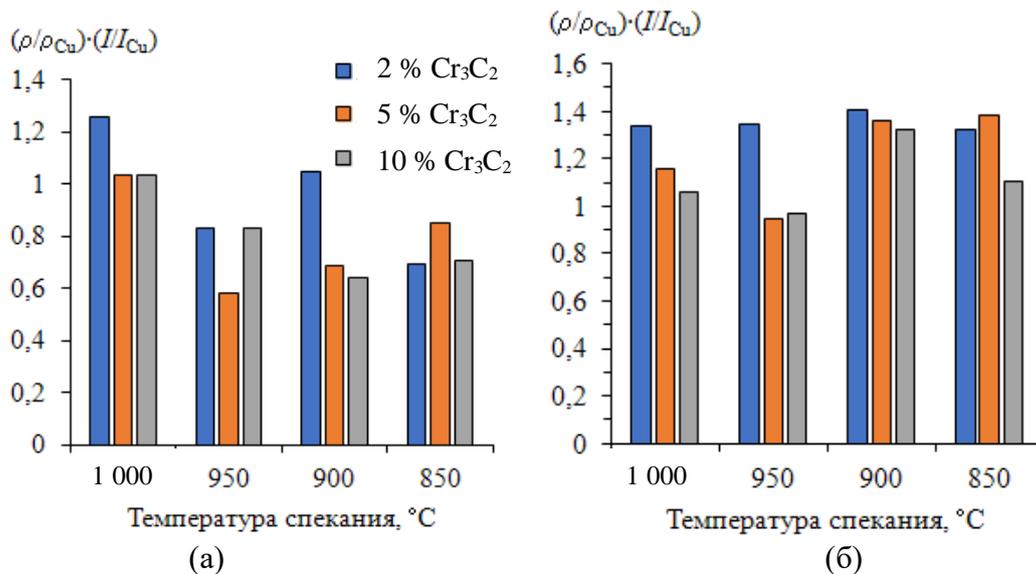
Электрическая проводимость исследованных материалов в основном невысокая – 50...60 % от проводимости меди. Наибольшей электропроводностью обладают образцы (независимо от содержания карбида хрома), спеченные при температуре 1 000 °С (75...90 % от проводимости меди), но, к сожалению, эти образцы имеют низкую электроэрозионную износостойкость – 85...100 % от износостойкости меди.

Таблица 3. Состав и характеристики исследованных образцов в сравнении с эталоном

Характеристика	$T_{сп}, ^\circ\text{C}$	Состав		
		Cu + + 2 % Cr_3C_2	Cu + + 5 % Cr_3C_2	Cu + + 10 % Cr_3C_2
H/H_{Cu}	1 000	0,59	0,64	0,79
	950	0,53	0,79	0,91
	900	0,59	0,72	0,86
	850	0,79	1,00	0,91

Характеристика	$T_{сп}$, °C	Состав		
		Cu + + 2 % Cr ₃ C ₂	Cu + + 5 % Cr ₃ C ₂	Cu + + 10 % Cr ₃ C ₂
σ/σ_{Cu}	1 000	0,75	0,90	0,82
	950	0,58	0,69	0,58
	900	0,62	0,67	0,56
	850	0,62	0,60	0,47
I/I_{Cu} анод (катод)	1 000	0,94 (1,00)	0,93 (1,04)	0,85 (0,87)
	950	0,48 (0,78)	0,40 (0,65)	0,48 (0,56)
	900	0,65 (0,87)	0,46 (0,91)	0,36 (0,74)
	850	0,43 (0,82)	0,51 (0,83)	0,33 (0,52)

Поскольку оптимальным сочетанием для электроконтактного материала в режиме электроэрозионного изнашивания являются малое удельное сопротивление и малый износ, за критерий сравнения материалов можно принять произведение относительных характеристик $(\rho/\rho_{Cu}) \cdot (I/I_{Cu})$. Значения этого произведения для исследованных материалов представлены на рисунке. По совокупности проводимости и износостойкости заслуживает внимания материал Cu + 5 % Cr₃C₂, спеченный при температуре 950 °C.



Сравнение электроконтактных характеристик исследованных материалов: анод (а); катод (б)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Электроэрозионная износостойкость материалов контакт-деталей в значительной мере определяет ресурс электроконтактных соединений. Электроэрозионное изнашивание является следствием сложных теплофизических и газодинамических процессов, происходящих в межэлектродном промежутке и на рабочей поверхности контакт-деталей. Теоретически оценить интенсивность электроэрозионного изнашивания электроконтактного материала не всегда представляется возможным. Приведенные в работе экспериментальные результаты могут оказаться полезными при выборе композиционного материала на медной основе для электрокоммутирующих устройств.

Экспериментальные результаты подтверждают, что введение карбида хрома в электроконтактный материал на медной основе существенно снижает интенсивность изнашивания по сравнению с медью.

ЛИТЕРАТУРА

1. Измайлов В.В., Гершман И.С., Новоселова М.В., Харитонов Е.О. Порошковые материалы для электрических контактов // *Материаловедение*. 2007. № 8. С. 22–28.
2. 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.
3. 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.
4. 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/TiO₂) // *Журнал технической физики*. 2015. Т. 85. № 12. С. 88–93.
5. 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 + Cr₃C₂ // *Физика металлов и материаловедение*. 2016. Т. 117. № 5. С. 530–537.
6. Еремина М.А., Трифонов И.С., Ломаева С.Ф., Тарасов В.В., Паранин С.Н., Заяц С.В. Структура и износостойкость нанокompозитов Cu-Cr₃C₂ // *Физическая мезомеханика*. 2016. Т. 19. № 6. С. 107–115.
7. Измайлов В.В., Новоселова М.В. Электроконтактные свойства композиционного алмазосодержащего медного материала // *Все материалы. Энциклопедический справочник*. 2020. № 5. С. 25–29.
8. Самсонов Г.В., Веницкий И.М. Тугоплавкие соединения. М.: Металлургия, 1976. 560 с.
9. Патент РФ 2265862. *Способ оценки электроэрозионной износостойкости материалов для электрических контактов* / Измайлов В.В., Новоселова М.В. Заявл. 05.04.2004. Опубл. 10.12.2005, Бюл. № 34.
10. 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.
11. Буткевич Г.В., Белкин Г.С., Ведешенков Н.А., Жаворонков М.А. Электрическая эрозия сильноточных контактов и электродов. М.: Энергия, 1978. 256 с.

Для цитирования: 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.

ELECTRICAL CONTACT PROPERTIES OF THE MATERIAL CONTAINING REFRACTORY COMPONENTS. COMPOSITE COPPER – CHROMIUM CARBIDE

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 electrical contact characteristics of a composite powder material on a copper base with different contents of chromium carbide are presented. The electrical resistivity, hardness and electrical erosion wear of the studied samples are

presented in absolute values and in comparison, with similar characteristics of the reference material – electric copper. The effect of the sintering temperature of the carbide-containing composite material on its electrical contact properties, as well as the dependence of the electroerosive wear on the polarity of the sample (sample – anode and sample – cathode) was investigated.

Keywords: composite material, copper, chromium carbide, electrical conductivity, electroerosive wear, sintering temperature.

REFERENCES

1. 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).
2. 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).
3. 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).
4. Zeer G.M., Zelenkova E.G., Beletskiy V.V., Nikolaev S.V., Kozhurin A.N., Kuchinsky M.Yu., Grigorieva O.A. Microstructure and properties of electrocontact material Cu- (ZnO/TiO₂). *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki*. 2015. V. 85, No 12, pp. 88–93. (In Russian).
5. 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 + Cr₃C₂. *Fizika metallov i metallovedeniye*. 2016. V. 117. No 5, pp. 530–537. (In Russian).
6. Eremina M.A., Trifonov I.S., Lomaeva S.F., Tarasov V.V., Pararin S.N., Zayats S.V. Structure and wear resistance of Cu-Cr₃C₂ nanocomposites. *Fizicheskaya mekhanika*. 2016. V. 19. No 6, pp. 107–115. (In Russian).
7. 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).
8. Samsonov G.V., Vinitkiy I.M. Refractory compounds. Moscow: Metallurgiya, 1976. 560 p.
9. Patent RF 2265862. *Sposob otsenki elektroerozionnoy iznosostoykosti materialov dlya elektricheskikh kontaktov* [Method for assessing the electrical discharge wear resistance of materials for electrical contacts]. Izmailov V.V., Novoselova M.V. Declared 05.04.2004, Published 10.12.2005, Bulletin No 34.
10. 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).
11. Butkevich G.V., Belkin G.S., Vedeshenkov N.A., Zhavoronkov M.A. Electrical erosion of high current contacts and electrodes. Moscow: Energiya, 1978. 256 p.

Поступила в редакцию/received: 02.02.2021; после рецензирования/revised: 03.03.2021;
принята/accepted: 15.03.2021

ОБ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОМ ИЗНАШИВАНИИ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКОМ БАЛАНСЕ В РЕЖИМЕ ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНОГО РАЗРЯДА

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

Проведена оценка применимости тепловой концепции электрической эрозии к сравнительным испытаниям электроконтактных материалов на электроэрозионную износостойкость в режиме импульсного разряда. Приведено сравнение величин удельной эрозии, полученных экспериментально и путем теоретического расчета. Отмечено, что для получения количественного соответствия экспериментальных и теоретических оценок необходимо применять полуэмпирический подход, при котором в теоретических расчетных зависимостях используются параметры, определяемые экспериментально. Проверена возможность применения критерия Палатника, совмещающего в себе комплекс теплофизических характеристик материала электродов, для сравнительной оценки и выбора материалов контакт-деталей.

Ключевые слова: электроэрозионная износостойкость, импульсный разряд, критерий Палатника, баланс энергии, удельная электрическая эрозия.

DOI: 10.46573/2658-5030-2021-21-28

ВВЕДЕНИЕ

Электрическая эрозия относится к одному из основных механизмов изнашивания электроконтактных соединений и выступает как негативный фактор, который снижает надежность и долговечность электрического оборудования. При электроэрозионной обработке деталей процесс электрической эрозии используется как технологический инструмент, в некоторых случаях безальтернативный (например, при обработке сверхтвердых и сверхпрочных материалов). Процессы электрической эрозии привлекали и продолжают привлекать внимание специалистов, как теоретиков, так и практиков.

Принято различать несколько видов электрической эрозии [1]. Один из них – эрозия под действием импульсных электрических разрядов. Под общим термином «импульсный» обычно понимается разряд малой длительности. В зависимости от конкретных условий он может принимать форму искрового или дугового разряда, переходя от одной формы к другой. Для искрового разряда характерны очень малая длительность ($10^{-7} \dots 10^{-8}$ с) и достаточно большая разность потенциалов между электродами; с увеличением длительности искровой разряд переходит в дуговой [2].

Существует несколько теорий, объясняющих механизмы электроэрозионного изнашивания. Одной из признанных теорий электрической эрозии металлов является тепловая [1], согласно которой в результате воздействия концентрированного потока энергии материал электродов в приповерхностном слое плавится и частично испаряется. Расплавленный металл полностью или частично удаляется с электрода.

В импульсном разряде не вся энергия, подводимая к контакту, расходуется на эрозию материала электродов. Часть энергии переходит во внутреннюю энергию плазмы, образующейся в межконтактном зазоре, отводится в объем электродов за счет теплопроводности и т.д. [1].

Однако даже в рамках тепловой теории электроэрозионного изнашивания нет единства в подходах к интерпретации экспериментальных результатов и их теоретическому обоснованию. Цель данной работы – оценка применимости тепловой концепции электрической эрозии к сравнительным испытаниям электроконтактных материалов на электроэрозионную износостойкость в режиме импульсного разряда.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Электроэрозионному изнашиванию подвергались монолитные образцы из металлов (вольфрама, молибдена, серебра, меди), широко применяемых в электроконтактных соединениях, и композиты на медной основе. К последним относятся дисперсно-упрочненный композиционный материал [3] и порошковые композиты медь – хром с содержанием хрома 20...80 %; медь – карбид хрома (вольфрама) с содержанием карбида 2...10 %. Всего было исследовано двенадцать различных материалов.

Испытания материалов на электроэрозионное изнашивание проводили на установке, описанной в работе [4]. Плоский образец из исследуемого материала контактировал с вольфрамовым электродом – зондом диаметром 1 мм. Вольфрам выбран в качестве материала зонда из-за его высокой электроэрозионной стойкости. Источником энергии импульсного разряда служил емкостный накопитель. Максимальная энергия разряда $W_0 = 3,2$ Дж.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ

Критерий электроэрозионной стойкости. При выборе материала для контактных деталей электроконтактных устройств полезно опираться на количественные критерии, позволяющие провести оценку его электроэрозионной стойкости в сравнении с другими вариантами. Одним из них является известный критерий Л.С. Палатника [5], который можно записать в виде

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

где $T_{\text{пл}}$ – температура плавления материала электрода; λ – теплопроводность; $c_{\text{уд}}$ – удельная теплоемкость; d – плотность. В таком виде критерий имеет размерность величины $q\sqrt{t}$, где q – плотность потока энергии; t – время.

Физический смысл критерия в том, что он позволяет оценить время, необходимое для нагревания материала до температуры плавления при данной плотности потока энергии:

$$t_{\text{пл}} = k \frac{\Pi^2}{q^2},$$

где k – безразмерный коэффициент.

Как отмечается в работе [5], критерий Палатника характеризует износостойкость материала в условиях искрового разряда. Очевидно, что чем больше величина критерия, тем выше эрозионная стойкость материала (меньше величина износа).

Баланс энергии в импульсном разряде. Исходя из тепловой концепции электрической эрозии, баланс энергии в импульсном разряде можно записать в виде

$$W_0\eta = W_1 + W_2, \quad (2)$$

где W_0 – энергия, запасенная в источнике; η – коэффициент, значение которого лежит в интервале $0 \dots 1$; W_1 – энергия, затраченная на нагревание и плавление материала электрода; W_2 – энергия, затраченная на нагревание и испарение части или всего расплавленного материала.

Расчетные зависимости для величин W_1 и W_2 в таком случае имеют вид:

$$W_1 = mc_{\text{тв}}(T_{\text{пл}} - T_0) + mL_{\text{пл}}; \quad (3)$$

$$W_2 = \alpha mc_{\text{ж}}(T_{\text{исп}} - T_{\text{пл}}) + \alpha mL_{\text{исп}}, \quad (4)$$

где m – масса удаленного с поверхности электрода материала; $c_{\text{тв}}$ и $c_{\text{ж}}$ – удельные теплоемкости материала электрода в твердом и жидком состоянии соответственно; $T_{\text{пл}}$ и $T_{\text{исп}}$ – температура плавления и испарения материала соответственно; T_0 – рабочая температура контакт-детали; $L_{\text{пл}}$ и $L_{\text{исп}}$ – удельная теплота плавления и испарения материала соответственно; α – доля испарившегося материала.

По результатам экспериментальных исследований различных авторов можно заключить, что для типичных электроконтактных материалов доля испарившегося материала составляет $1/3$ и более [6–8]. Для тугоплавких металлов $\alpha = 0,4 \dots 0,6$; для металлов со средней температурой плавления $\alpha = 0,2 \dots 0,4$; для легкоплавких металлов $\alpha = 0,1 \dots 0,2$ [5].

Количественные характеристики электроэрозионного изнашивания. Многочисленными исследованиями установлено, что масса удаленного материала в процессе электроэрозионного изнашивания пропорциональна числу циклов коммутации, энергии, подводимой к контакту, и количеству электричества (заряду), прошедшего через контакт за один цикл. В литературе приводятся различные величины удельного износа (удельной эрозии) [5, 9]. Перечислим их.

1. Объемная I_V и массовая I_m эрозия в расчете на один цикл, $\text{м}^3/\text{цикл}$ и $\text{кг}/\text{цикл}$ соответственно:

$$I_V = V/n_{\text{ц}}; \quad I_m = m/n_{\text{ц}},$$

где V и m – объем и масса материала, потерянные электродами в результате эрозии за количество циклов $n_{\text{ц}}$.

2. Объемная и массовая эрозия в расчете на единицу коммутируемой за один цикл энергии W , $\text{м}^3/\text{Дж}$ и $\text{кг}/\text{Дж}$ соответственно:

$$I_V = V/(n_{\text{ц}}W); \quad I_m = m/(n_{\text{ц}}W).$$

3. Объемная и массовая эрозия в расчете на единицу заряда Q , прошедшего через контакт, $\text{м}^3/\text{Кл}$ и $\text{кг}/\text{Кл}$ соответственно:

$$I_V = V/(n_{ц}Q); \quad I_m = m/(n_{ц}Q),$$

где $Q = \int_0^{t_{и}} i dt$; i – ток через контакт; $t_{и}$ – длительность импульса.

Для сравнительных (качественных) испытаний, когда эксперименты с различными материалами проводятся на одной установке в одинаковых условиях, можно использовать все три характеристики. Для количественных оценок, в том числе для проверки энергетического баланса, можно применять только вторую и третью характеристики.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Зависимость величины удельной эрозии от полярности электрода. Одно из существенных отличий искровой формы импульсного разряда от дуговой – соотношение величин удельной эрозии электродов разной полярности – катода и анода. Обычно при искровом разряде больше изнашивается анод, при дуговом – катод. Результаты наших экспериментов по исследованию зависимости электроэрозионного изнашивания от полярности электрода представлены на рис. 1.

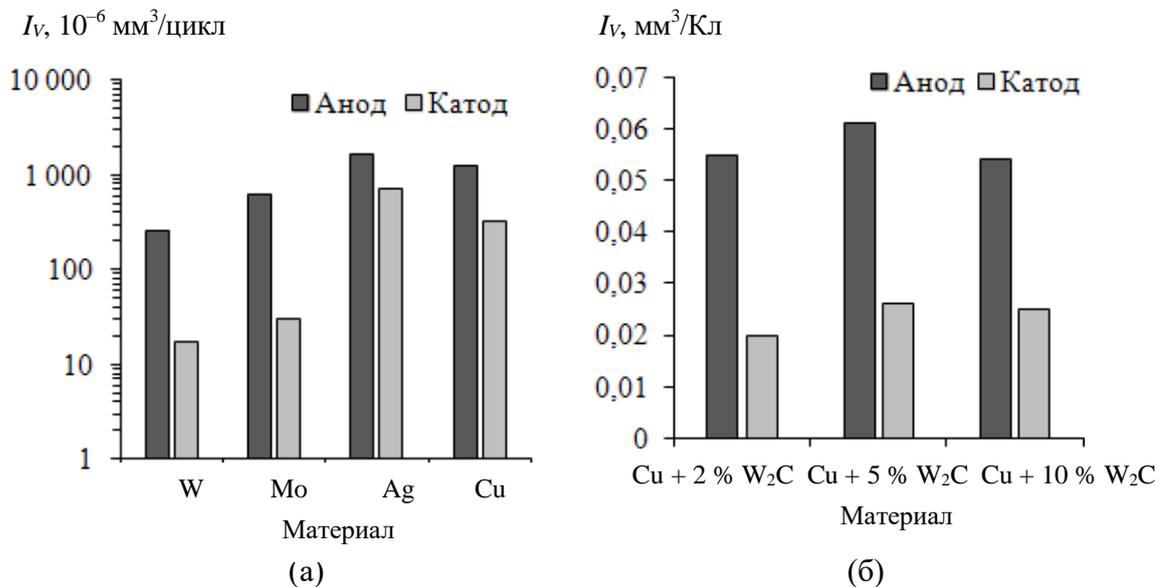


Рис. 1. Зависимость удельной эрозии материала электрода от его полярности: монокристаллические материалы (а); порошковые композиты (б)

Как видно из рис. 1, в условиях описываемых экспериментов материал анода изнашивается больше, чем материал катода. Этот вывод справедлив также для целой серии композиционных материалов различного состава, испытанных нами, но не показанных на рис. 1. На этом основании можно сделать вывод, что в данном случае импульсный разряд близок к искровому.

Величина удельной эрозии, помимо полярности, в значительной степени зависит от природы электроконтактного материала и может отличаться для различных материалов в десятки раз (рис. 1а). По этой причине на рис. 1а по оси ординат использована логарифмическая шкала. Более подробно влияние теплофизических параметров материала на величину удельной эрозии опишем далее с помощью критерия электроэрозионной стойкости Л.С. Палатника.

Критерий Палатника как характеристика электроэрозионной стойкости материала. Значения критерия, рассчитанные согласно уравнению (1) для некоторых типичных электроконтактных материалов, приведены в таблице.

Величины критерия Палатника для электроконтактных материалов [5]

Материал	Вольфрам	Молибден	Медь	Серебро
П, (Вт/м ²)с ^{1/2}	65,4	42,6	41,4	31,4

Результаты экспериментов, представленные на рис. 2, подтверждают ожидаемую зависимость, вытекающую из физического смысла критерия Палатника: чем больше значение критерия, тем меньше величина удельной эрозии (выше эрозионная износостойкость). Таким образом, в условиях искрового разряда еще раз подтверждена возможность использования критерия Палатника для качественного сравнения электроконтактных материалов с точки зрения их электроэрозионной износостойкости.

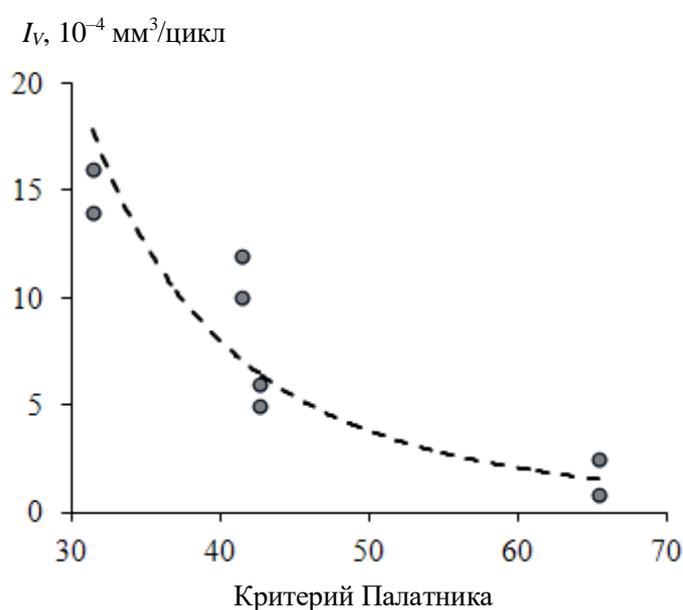


Рис. 2. Зависимость удельной эрозии материала анода от величины критерия Палатника: • – экспериментальные результаты; пунктир – линия тренда (различные значения удельной эрозии при одном значении критерия соответствуют различному взаимному расположению электродов)

Баланс энергии при электроэрозионном изнашивании. Анализируя энергетический баланс электроимпульсного разряда, логично характеризовать износостойкость материала отношением массы или объема материала, потерянного вследствие эрозии, к величине коммутируемой энергии. С учетом уравнений (3) и (4) получим формулы для теоретической оценки массовой и объемной эрозии:

$$I_{m \text{ теор}} = \frac{m}{W_1 + W_2} = \frac{1}{c_{\text{ТВ}}(T_{\text{пл}} - T_0) + L_{\text{пл}} + \alpha c_{\text{ж}}(T_{\text{исп}} - T_{\text{пл}}) + \alpha L_{\text{исп}}} ; \quad (5)$$

$$I_{V \text{ теор}} = \frac{V}{W_1 + W_2} = \frac{I_m}{d}. \quad (6)$$

Рассчитанные по уравнениям (5) и (6) величины удельной эрозии больше соответствующих экспериментальных величин $I_{m \text{ эксп}} = m/W_0$ и $I_{V \text{ эксп}} = V/W_0$. Например, для меди $I_{V \text{ эксп}} = 1,2 \cdot 10^{-11}$ м³/Дж, тогда как $I_{V \text{ теор}} = 4,9 \cdot 10^{-11}$ м³/Дж; для молибдена $I_{V \text{ эксп}} = 0,5 \cdot 10^{-11}$ м³/Дж и $I_{V \text{ теор}} = 2,1 \cdot 10^{-11}$ м³/Дж. Очевидная причина этого состоит в следующем: в формулах (5) и (6) предполагается, что вся энергия, запасенная в источнике, выделяется в виде тепла в приповерхностных слоях материала, в формуле (2) принимается $\eta = 1$. На самом деле значение коэффициента $\eta < 1$. Автор работы [1] приводит шесть возможных каналов расходования энергии источника, из которых отвод энергии в материал электродов с последующим его удалением далеко не единственный. Очевидно, что величина коэффициента η зависит от многих, порой случайных, трудно поддающихся теоретическому анализу факторов. В случае электроэрозионной обработки материалов величину η можно трактовать как коэффициент полезного действия процесса; для электроэрозионного изнашивания такая трактовка, разумеется, бессмысленна. В число факторов, влияющих на значение коэффициента η , входит величина межконтактного зазора, в котором происходит электрический разряд. По данным работы [9], для искрового разряда и медных электродов (в зависимости от величины зазора) коэффициент $\eta \approx 0,30 \dots 0,67$. Учитывая потери энергии (см. формулу (2)), можно получить разумное соответствие экспериментальных и теоретических величин удельной эрозии. На рис. 3 представлено сравнение расчетных значений удельной объемной эрозии с результатами наших экспериментов для двенадцати материалов. Несмотря на значительный разброс данных, наблюдается высокая степень корреляции экспериментальных и теоретических величин с коэффициентом корреляции $R = 0,83$.

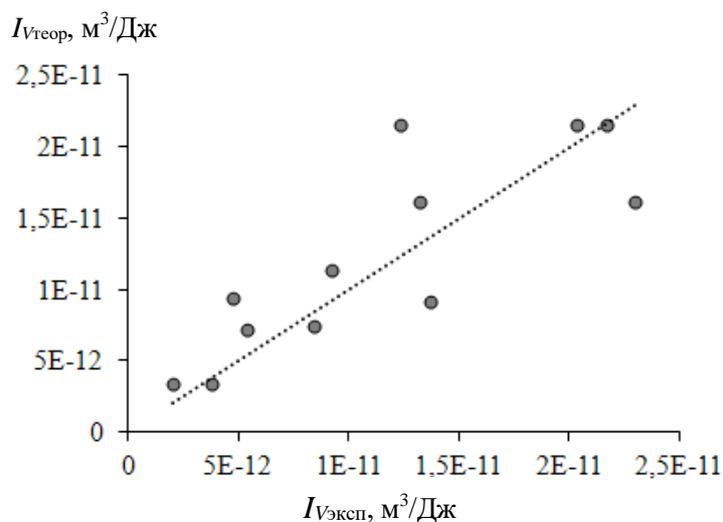


Рис. 3. Сравнение теоретических и экспериментальных значений объемной удельной эрозии при $\eta = 0,44$: точки – результаты экспериментов; пунктир – $I_{V \text{ теор}} = I_{V \text{ эксп}}$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты экспериментов, проведенных на установке и по методике сравнительного испытания электроконтактных материалов на электроэрозионную износостойкость, показали качественное соответствие основным положениям признанной тепловой концепции электрической эрозии металлов. Тем самым подтверждена возможность применения данной методики для сравнительных испытаний материалов на электроэрозионную износостойкость в режиме импульсного разряда. Для получения количественного соответствия экспериментальных и теоретических оценок необходимо учитывать энергетический баланс электроимпульсного разряда, в частности долю подводимой к контакту энергии, которая расходуется непосредственно на удаление

материала. Это сложно сделать чисто теоретически ввиду многочисленности и случайного характера факторов, влияющих на энергетический баланс разряда. Остается полуэмпирический подход, при котором в теоретических расчетных зависимостях используются параметры, определяемые экспериментально. Чем больше экспериментальная база таких параметров, тем достовернее будут результаты расчетов.

Эксперименты подтвердили, что для сравнительной оценки и выбора материалов контакт-деталей с точки зрения их электроэрозионной износостойкости может успешно применяться критерий Палатника, совмещающий в себе комплекс теплофизических характеристик материала электродов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Намитокон К.К. Электроэрозионные явления. М.: Энергия, 1978. 456 с.
2. Полянчиков Ю.Н., Схиртладзе А.Г., Воронцова А.Н., Полянчикова М.Ю., Тибиркова М.А., Сидякин Ю.И., Кожевникова А.А. Электрохимические и электрофизические методы обработки в современном машиностроении: учеб. пособие. Волгоград: ВолгГТУ, 2015. 240 с.
3. Берент В.Я. Материалы и свойства электрических контактов в устройствах железнодорожного транспорта. М.: Интекст, 2005. 408 с.
4. 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.
5. Буткевич Г.В., Белкин Г.С., Ведешенков Н.А., Жаворонков М.А. Электрическая эрозия сильноточных контактов и электродов. М.: Энергия, 1978. 256 с.
6. Плоскин В.В. Структурные и фазовые превращения в поверхностных слоях сталей при электроэрозионной обработке: дис. ... д-ра техн. наук. М., 2006. 281 с.
7. Химухин С.Н., Хосен Ри, Ри Э.Х. Структура и свойства металлов и сплавов при электроискровом воздействии: монография. Хабаровск: ТОГУ, 2015. 127 с.
8. Пугачевский М.А. Структурно-фазовые превращения в поверхностных слоях Cu, Ni, Mo под действием однократных электрических разрядов: дис. ... канд. физ.-мат. наук. Хабаровск, 2006. 135 с.
9. Ставицкий Б.И. Из истории электроискровой обработки материалов. Харьков: ЦентрИнформ, 2013. 104 с.

Для цитирования: Измайлов В.В., Новоселова М.В. Об электроэрозионном изнашивании и энергетическом балансе в режиме электроимпульсного разряда // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2021. № 2 (10). С. 21–28.

ON ELECTRIC EROSION WEAR AND ENERGY BALANCE IN ELECTRIC PULSE DISCHARGE MODE

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

An assessment of the applicability of the thermal concept of electrical erosion to comparative tests of electrical contact materials for electrical discharge wear resistance in a pulsed discharge mode is carried out. A comparison of the values of specific

erosion obtained experimentally and by theoretical calculation is presented. It is noted that to obtain a quantitative agreement between the experimental and theoretical estimates, it is necessary to use a semi-empirical approach, in which the parameters determined experimentally are used in the theoretical calculated dependences. The results of testing monolithic and composite specimens for electroerosive wear resistance confirmed that the Palatnik criterion, which combines a set of thermophysical characteristics of the electrode material, can be used for comparative assessment and selection of materials for contact parts.

Keywords: electroerosive wear resistance, pulse discharge, Palatnik criterion, energy balance, specific electrical erosion.

REFERENCES

1. Namitokov K.K. Elektroerozionnye yavleniya [Electrical discharge phenomena]. Moscow: Energiya, 1978. 456 p.
2. Polyanchikov Yu.N., Skhirtladze A.G., Vorontsova A.N., Polyanchikova M.Yu., Tibirkova M.A., Sidyakin Yu.I., Kozhevnikova A.A. Elektrokhimicheskiye i elektrofizicheskiye metody obrabotki v sovremennom mashinostroyenii: ucheb. posobiye [Electrochemical and electrophysical processing methods in modern mechanical engineering: textbook]. Volgograd: VolgGTU, 2015. 240 p.
3. Berent V.Ya. Materialy i svoystva elektricheskikh kontaktov v ustroystvakh zheleznodorozhnogo transporta [Materials and properties of electrical contacts in railway transport devices]. Moscow: Intekst, 2005. 408 p.
4. 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).
5. 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.
6. Ploshkin V.V. Structural and phase transformations in the surface layers of steels during electrical discharge machining: Dr. dis. (technical). Moscow, 2006. 281 p. (In Russian).
7. Khimukhin S.N., Hosen Ri, E.H. Ri Struktura i svoystva metallov i splavov pri elektroiskrovom vozdeystvii: monografiya [Structure and properties of metals and alloys with electrospark action: monograph]. Khabarovsk: TOGU, 2015. 127 p.
8. Pugachevsky M.A. Structural-phase transformations in the surface layers of Cu, Ni, Mo under the action of single electric discharges: Cand. dis. (phys.-math.). Khabarovsk, 2006. 135 p. (In Russian).
9. Stavitsky B.I. Iz istorii elektroiskrovoy obrabotki materialov [From the history of electrospark processing of materials]. Kharkov: CenterInform, 2013. 104 p.

Поступила в редакцию/received: 25.02.2021; после рецензирования/revised: 03.03.2021;
принята/accepted: 15.03.2021

МОНИТОРИНГ СОСТОЯНИЯ УЗЛОВ ТРЕНИЯ ПО АНАЛИЗУ СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

А.М. МИГРАНОВ, аспирант, М.Ш. МИГРАНОВ, д-р техн. наук,
Р.Г. НИГМАТУЛЛИН, д-р техн. наук, С.Р. ШЕХТМАН, д-р техн. наук

Уфимский государственный авиационный технический университет,
450008, г. Уфа, ул. К. Маркса, д. 12, e-mail: migmars@mail.ru

© Мигранов А.М., Мигранов М.Ш., Нигматуллин Р.Г.,
Шехтман С.Р., 2021

Разработана и внедрена цифровая система мониторинга техники (ЦСМТ), которая включает в себя динамическую фиксацию количества продуктов износа и температуры масла оригинальными современными регистрирующими устройствами с последующей технологией их обработки и использования. Система позволяет осуществлять поиск необходимой информации о работе контролируемой техники в больших массивах данных. Преимуществами ЦСМТ являются возможность прогнозирования надежности работы техники, снижение производственных рисков и существенное сокращение неэффективных затрат.

Ключевые слова: цифровая система мониторинга, смазочные материалы, качество, работоспособность, дефекты, мониторинг, техника.

DOI: 10.46573/2658-5030-2021-29-38

ВВЕДЕНИЕ

В условиях падения нефтяных котировок и роста курса валют отмечается сокращение доходности предприятий и остро стоит задача оптимизации затрат на обслуживание оборудования и транспорта, что, наряду с задачами правительства РФ по импортозамещению, определяет высокий платежеспособный спрос на инновационные, эффективные отечественные системы диагностики для поддержания работоспособности техники. Значительную долю в структуре затрат предприятий транспорта и промышленности, в том числе топливно-энергетического комплекса, занимают расходы на техническое обслуживание, диагностику и ремонт динамического оборудования [1, 2]. При этом используемые для диагностики системы, как правило, выявляют неисправность двигателей и оборудования на том этапе, когда уже требуется замена их рабочих деталей либо двигателей и оборудования в целом, что обуславливает высокие затраты предприятий на поддержание основных фондов. Кроме того, ущерб от простоя всех видов транспорта и производства вследствие внезапного отказа двигателей и оборудования может в десятки раз превышать стоимость ремонта. Использование ЦСМТ позволит сократить затраты на техобслуживание транспорта и оборудования, избежать поломки и незапланированных простоев. Цель работы – оценка эффективности ЦСМТ.

ТЕОРЕТИКО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

По результатам анализа компанией SHELL эксплуатации техники в 65 строительных компаниях в различных регионах России, установлено, что отечественный бизнес несет убытки. На 34 % предприятий непредвиденные перебои в эксплуатации техники за три года привели к потерям свыше 6 млн руб. Убытки 25 % предприятий

превысили 15 млн руб. Более половины компаний (53 %) полагают, что грамотная эксплуатационная политика в сфере горючесмазочных материалов (ГСМ) способна обеспечить сокращение расходов не менее чем на 5 %. На 5 % предприятий считают, что благодаря правильному подбору смазочных материалов экономия могла бы составить более 25 %.

Многолетний опыт компании SHELL показывает, что при эффективном использовании ГСМ двигатели не требуют капитального ремонта и замены даже при наработке более 35 тыс. мотто-часов и пробеге автотранспортных средств (АТС) свыше 1,2 млн км [2].

Поломка станков и АТС часто происходит из-за использования некачественных ГСМ, включая технические и смазывающе-охлаждающие жидкости, на которые узлы трения и детали станков и АТС реагируют едва заметными сигналами, как правило, не привлекающими внимания среднестатистического станочника или водителя [3]. Со временем эти сигналы выходят наружу в виде шума, черного дыма из глушителя, вибрации. В результате станки и АТС приходится останавливать для проведения дорогостоящего ремонта.

Необходимо отметить, что в настоящее время немало научных исследований направлено на повышение работоспособности смазочных материалов, работающих в тяжело нагруженных узлах трения техники [5, 6]. В то же время и они подвержены разложению при попадании влаги, топлива и сажи [3]. Это требует создания системы, позволяющей на ранней стадии выявлять неполадки в узлах трения техники и предотвращать их выход из строя. Статистика поломок техники по причине использования некачественных смазочных материалов практически не меняется в лучшую сторону. На это есть причины, и они кроются в техническом обслуживании оборудования.

Сегодня широко распространены три подхода к обслуживанию станков и АТС: ремонт и замена агрегатов станков и АТС по факту выхода из строя деталей, узлов трения. В этом случае не требуются затраты на диагностику и профилактику, но капитальные затраты значительны;

регулярное проведение технического обслуживания и профилактических работ станков и АТС, при этом вероятность внезапной поломки снижается, но затраты на техническое обслуживание и профилактические работы возрастают;

использование качественных смазочных материалов, включая технические и смазывающе-охлаждающие жидкости, выявление и устранение дефектов станков и АТС на ранней стадии по результатам компьютерной диагностики и анализа работающей техники. В этом случае снижаются затраты на техническое обслуживание, расходные материалы (фильтр, масло и пр.), запасные части и ремонт.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Статистика показывает, что многие владельцы техники, как правило, придерживаются первого и второго подходов. Третий подход по силам только владельцам, имеющим собственные аналитические лаборатории для контроля ГСМ и диагностическое оборудование. В ООО «Химмотолог» (г. Уфа) разработана и используется инновационная ЦСМТ. Основное устройство, работающее на электромагнитных колебаниях, устанавливается непосредственно в маслобак (либо через заливную горловину, либо в сливной болт). Необходимые сигналы от датчика поступают во входное устройство ЭВМ, где наряду с другой технической информацией анализируется химический состав масла. На устройствах вывода ЭВМ показывает конечный результат. Таким результатом, как правило, бывают графики, таблицы или отдельные значения каких-либо параметров.

Цифровая система мониторинга техники позволяет использовать третий подход практически всем владельцам техники. Система основывается на определении износа в узлах трения техники с помощью беспроводной связи BlueTooth, которая в онлайн-режиме передает на сотовый телефон или компьютер владельца техники [7, 8] данные по текущему состоянию узлов трения, графики концентрации частиц износа в зависимости от времени, прогноз и рекомендации по срокам замены смазки и проведению ремонтных работ. Предложенная система разработана в рамках инновационного подхода к эксплуатации и техническому обслуживанию техники путем выявления с помощью цифровой системы мониторинга неисправностей и причин износа ее узлов трения на ранней стадии.

Достоинствами ЦСМТ являются:

- низкая стоимость;
- высокая точность;
- универсальность;
- малые затраты времени на анализ;
- простота использования;
- дешевые расходные материалы;
- компактность;
- мобильность и энергоэффективность.

Аппаратная архитектура датчика износа и температуры показана на рис. 1.



Рис. 1. Аппаратная архитектура датчика износа и температуры

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 2 показаны графики износа узлов трения в двигателе автомобиля «Газель» на моторном масле разного качества: при использовании моторного масла SAE10W40 с низким ресурсом (образец № 1), а также аналогичного (образец № 2) и оригинального (образец № 3) моторных масел того же класса разных производителей.

На графике наблюдается резкое увеличение износа до 42 мг при пробеге автомобиля всего 6 тыс. км по причине низкого содержания в моторном масле противоизносной присадки (ее в 1,7 раза меньше, чем в оригинальных моторных маслах). По разработанной методике, нагревая частицы, собранные датчиком, и используя увеличительное стекло, можно распознать тип износа, установить принадлежность частиц износа к определенной группе деталей агрегата автомобиля и выявить причины повышенного износа: некачественные смазочные материалы и ухудшение качества масел из-за попадания в него пыли, охлаждающей жидкости, топлива и сажи и др. Конструктивно датчик износа и программное обеспечение его работы не имеют аналогов в России и за рубежом (патенты РФ № 2677490, № 2569766, патентообладатель – ООО «Химмотолог»). Датчик прошел испытания на двигателях и коробках передач автомобилей «Газель», «Тойота», «Паджеро», «Форд», «Катер-

пиллер», компрессоров Atlas Copco, Абас, станках с ЧПУ и др. Цифровая система мониторинга техники состоит из датчика и блока управления и предназначена для контроля состояния техники, определения концентрации частиц износа, предупреждения аварийных ситуаций. Датчик может устанавливаться в картеры двигателя внутреннего сгорания, компрессоров, коробки передач, раздаточные коробки, мосты и другие узлы трения.

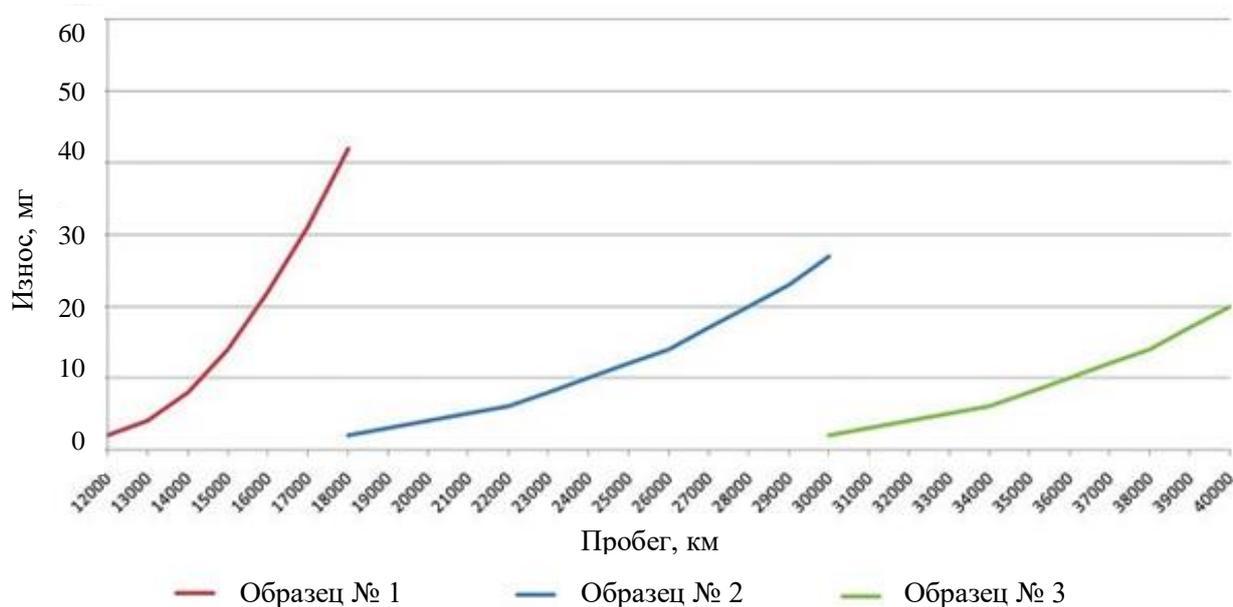


Рис. 2. Влияние качества масла на износ двигателя внутреннего сгорания

Содержание металлов в работающем масле зависит от износостойкости деталей, эффективности системы очистки, противоизносных, моюще-диспергирующих и других свойств масла и их изменения в процессе работы. В работающем масле частицы металлов имеют размер от единиц до сотен микрометров. Наиболее сильный износ пары трения вызывают частицы размером от 10 до 60 мкм. В табл. 1 приведены браковочные показатели износа [1].

Таблица 1. Браковочные показатели износа различных агрегатов

Тип агрегата	Концентрация железа	
	Норма, мг/кг масла, не более	Предельное значение, мг/кг масла
Двигатели внутреннего сгорания	30	150...300
Гидравлические системы и механизмы	10	30
Компрессоры	25	50
Редукторы и зубчатые передачи	100	250
Трансмиссии	80	200
Турбины	20	30

Концентрация частиц железа к концу запланированного срока службы масла не должна превышать предельно допустимое значение. Коэффициент скорости износа v определяется как отношение концентрации частиц, собранных за время работы датчика, к предельно допустимой концентрации на момент замены масла. При этом, если $v \leq 1$, то имеет место износ в пределах нормы; если $v \geq 1$ – повышенный износ.

Значение коэффициента v увеличивается с ростом скорости износа. Высокая скорость износа свидетельствует либо о плохом качестве смазочного материала, о неисправности деталей или систем (охлаждения, смазки, топливной и др.) техники.

Внедрение цифровой аналитической системы позволит:

защититься от контрафактной продукции;

существенно сократить затраты на ремонт, техническое обслуживание, покупку смазочных материалов;

повысить надежность и увеличить ресурс работы техники (что особенно важно в связи с тенденциями к возрастанию степени ее автономности);

своевременно выявлять дефекты оборудования и воздействие негативных факторов, тем самым снизить вероятность возникновения аварийных ситуаций;

уменьшить время аварийного простоя техники (и, соответственно, простоя производства);

снизить попадание загрязняющих веществ в окружающую среду, уменьшить количество отходов смазочных материалов.

В качестве первого примера приведем расчет экономического эффекта от внедрения диагностики по контролю смазочного материала (у автомобиля «Газель»):

$$E = E_y - E_{nc} \cdot C,$$

где E_y – годовая экономия; E_{nc} – нормативный коэффициент эффективности (0,15); C – затраты при исходных данных:

средний пробег автомобиля за год: 50 000 км;

стоимость диагностической системы: 16 000 руб.;

стоимость замены моторного масла и фильтров: 3 050 руб.;

стоимость замены трансмиссионного масла: 2 100 руб.;

стоимость двигателя (с установкой): 93 000 руб.;

стоимость текущего ремонта двигателя: 11 000 руб.;

стоимость раздаточной коробки (с установкой): 16 000 руб.

Результаты расчета основных технико-экономических показателей представлены в табл. 2.

Годовая экономия при среднегодовом пробеге 50 000 км

$$E_y = 54\,708 - 33\,350 = 21\,358 \text{ руб.}$$

Установка диагностической системы окупится после пробега

$$S = (50\,000 / 21\,358) \cdot 16\,000 = 37\,457 \text{ км.}$$

Годовой экономический эффект от установки диагностической системы и внедрения диагностики по анализу масла

$$E = 21\,358 - 0,15 \cdot 16\,000 = 18\,958 \text{ руб.}$$

Таблица 2. Основные технико-экономические показатели

Показатель	Без системы диагностики	С системой диагностики
Интервал замены моторного масла, км	10 000	15 000
Интервал замены трансмиссионного масла, км	40 000	60 000
Средний пробег двигателя, км	200 000	300 000
Средняя частота текущего ремонта двигателя, км	50 000	150 000
Средний пробег раздаточной коробки, км	150 000	200 000
Среднегодовые затраты на замену моторного масла, руб.	15 250	10 167
Среднегодовые затраты на замену трансмиссионного масла, руб.	2 625	1 750
Среднегодовые затраты на замену двигателя, руб.	23 250	15 500
Среднегодовые затраты на текущий ремонт двигателя, руб.	8 250	1 833
Среднегодовые затраты на замену раздаточной коробки, руб.	5 333	4 100
Общие среднегодовые затраты, руб.	54 708	33 350

За весь период эксплуатации автомобиля установка диагностической системы позволит сэкономить более 200 000 руб., продлить срок службы, уменьшить (или полностью исключить) издержки, связанные с простоем автомобиля.

В качестве второго примера приведем внедрение системы диагностики компрессора Atlas Copco контролю работающего в нем смазочного материала (табл. 3–5).

Таблица 3. Стоимость вспомогательных материалов

Вспомогательные материалы	Цена за единицу, руб.*	Без системы диагностики		С системой диагностики	
		Потребление в год, кг	Стоимость материалов, руб.	Потребление в год, кг	Стоимость материалов, руб.
Масло техническое	400	60	24 000	45	18 000
Фильтр масляный	500	60	30 000	45	22 500
Обтирочные материалы	6	6 426	38 554	4820	28 917
Мыло	10	660	6 600	495	4 950
Спецодежда	420	66	27 720	49	20 790
Итого			126 874		95 157

Примечание. * Цены указаны по ведомостям предприятия «УМПО» на 10.09.2018.

Таблица 4. Расходы на содержание и эксплуатацию оборудования

Наименование статьи	Сумма, руб.	
	Без системы диагностики	С системой диагностики
Эксплуатация оборудования	2 492 554	1 869 415
Текущий ремонт оборудования	34 320	25 740
Износ малоценных и быстроизнашивающихся предметов	137 244	102 933
Прочие расходы	132 205	99 904
Итого	2 797 323	2 097 992

Таблица 5. Смета расходов на обслуживание

Наименование статьи	Сумма, руб.	
	Без системы диагностики	С системой диагностики
Амортизация инвентаря	31 928	23 946
Содержание инвентаря участка	271 936	203 952
Испытания, опыты	2 000	1 500
Охрана труда	13 200	9 900
Прочие расходы	15 953	11 964
Итого	335 017	251 262

В результате внедрения описанной инновационной системы, позволившей контролировать работоспособность компрессора, время работы масла увеличилось в 1,5 раза по сравнению с регламентированными сроками, рекомендованными заводом-изготовителем компрессора.

Кроме того, снизились затраты на ряд материалов и важных действий:
на вспомогательные материалы – на 31 717 руб.;
содержание и эксплуатацию оборудования – на 699 331 руб.;
обслуживание компрессора – на 83 755 руб.

Отметим немаловажные перспективы коммерциализации: рынок представлен двумя основными сегментами:

крупные потребители (автопарки, промышленные предприятия и др.);
частные (автовладельцы и небольшие предприятия, где используется техника с маслонаполненными агрегатами).

Оба сегмента достаточно стабильны, и в долгосрочной перспективе прогнозируется устойчивая тенденция к росту.

Потенциальным и целевым сегментом потребителей создаваемого продукта является в первую очередь автотехника.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ООО «Химмотолог» часто обращаются владельцы легковых и грузовых автомобилей с заклинившим двигателем с просьбой выяснить причину поломки. Наиболее частые причины – это попадание в масло антифриза, воды, топлива, пыли и других примесей, использование некачественного масла и нарушение температурного режима эксплуатации. Все эти факторы не приводят к немедленной поломке двигателя, автомобиль может проехать сотни и тысячи километров до внезапной остановки. Штатные датчики не имеют возможности выявить такие ситуации, а диагностика работающего масла, позволяющая установить наличие данных факторов, проводится очень редко. В любом из этих случаев мониторинг состояния двигателя с помощью разработанной системы позволил бы выявить влияние негативных факторов и вовремя устранить причину поломки, не доводя положение дел до капитального ремонта [9].

Низкая стоимость устройств делает их доступными не только для организаций – владельцев автопарков, компрессоров, станков, но и для частных автовладельцев, так как позволяет следить за состоянием двигателя и трансмиссии автомобиля, вовремя устранять негативные факторы, оптимизировать частоту технического обслуживания и замены масла.

Использование ЦСМТ позволит сократить затраты на ГСМ, на техобслуживание оборудования, уменьшить количество отработанных масел и смазок, избежать незапланированного простоя автотранспорта, снизить выбросы в окружающую среду, повысить ресурс и надежность техники.

ЛИТЕРАТУРА

1. Фитч Дж., Тройер Д. Анализ масел. Основы и применение / под ред. Е.А. Новикова, М.В. Кирюхина. СПб.: Профессия, 2015. 166 с.
2. Криони Н.К., Мигранов М.Ш., Нигматуллин Р.Г., Мигранов А.М. Смазочные материалы в машинах и при лезвийной обработке: учеб. пособие. М.: Инновационное машиностроение, 2018. 221 с.
3. Салахов Т.З., Мигранов М.Ш., Нигматуллин Р.Г. Увеличение эффективности технического обслуживания промышленного оборудования на основе анализа состояния масла // *Успехи современной науки и образования*. 2017. Т. 5. № 2. С. 50–54.
4. Патент РФ № 2677490. *Способ и устройство для контроля состояния динамического оборудования* / Нигматуллин Р.Г. Нигматуллин В.Р. Нигматуллин И.Р., Пелецкий С.С., Фиофанов К.Н., Ахметов А.И., Хамидуллин Р.Г. Заявл. 14.10.2016. Оpubл. 17.01. 2019, Бюл. № 2.
5. Мигранов М.Ш., Нигматуллин Р.Г., Салахов Т.З., Хамидуллин Р.Г., Мигранов А.М. Текущая диагностика оборудования инновационным устройством // *Механика и физика процессов на поверхности твердых тел, деталей технологического и энергетического оборудования*. 2017. № 10. С. 68–71.

6. Хабибуллина Г.Р., Ахметова В.Р., Федотова Е.С., Нигматуллин В.Р., Нигматуллин Р.Г., Ибрагимов А.Г. Противоизносные и противозадирные свойства N-замещенных дитиазациклоалканов в минеральных маслах // *Нефтехимия*. 2016. Т. 56. № 6. С. 662–665.

7. Куксенова Л.И., Лаптева В.Г., Колмаков А.Г., Рыбакова Л.М. Методы испытаний на трение и износ. М.: Интернет инжиниринг, 2001. 151 с.

8. Петровская А.В., Хатипов С.А. Трибологические свойства наномодифицированных композиционных материалов на основе политетрафторэтилена // *Материаловедение*. 2011. № 4. С. 49–52.

9. Нигматуллин Р.Г. Цифровая аналитическая система ООО «Химмотолог» // *АБС-Авто*. 2017. № 12. С. 34–37.

Для цитирования: Мигранов А.М., Мигранов М.Ш., Нигматуллин Р.Г., Шехтман С.Р. Мониторинг состояния узлов трения по анализу смазочных материалов // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2021. № 2 (10). С. 29–38.

MONITORING OF THE STATE OF FRICTION UNITS BASED ON THE ANALYSIS OF LUBRICANTS

A.M. MIGRANOV, Postgraduate,
M.Sh. MIGRANOV, Dr. Sc.,
R.G. NIGMATULLIN, Dr. Sc.,
S.R. SHEKHTMAN, Dr. Sc.

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

A digital system for monitoring equipment has been developed and implemented, which includes dynamic recording of the amount of wear products and oil temperature by original modern recording devices with subsequent technology for their processing and use. The system allows you to search for the necessary information about the operation of controlled equipment in large data sets. The advantages of a digital equipment monitoring system are the ability to predict the reliability of equipment operation; reduction of production risks and significant reduction of ineffective costs.

Keywords: digital monitoring system, lubricants, quality, performance, defects, monitoring, equipment.

REFERENCES

1. Fitch J., Troyer D. *Analiz masel. Osnovy i primeneniye* [Analysis of oils. Basics and applications] / ed. E.A. Novikova, M.V. Kiryukhin. Saint Petersburg: Professiya, 2015. 166 p.

2. Krioni N.K., Migranov M.Sh., Nigmatullin R.G., Migranov A.M. *Smazochnyye materialy v mashinakh i pri lezviynoy obrabotke: uchebnoye posobiye* [Lubricants in machines and blade processing: a tutorial]. Moscow: Innovatsionnoye mashinostroyeniye, 2018. 221 p.

3. Salakhov T.Z., Migranov M.Sh., Nigmatullin R.G. Increasing the efficiency of maintenance of industrial equipment based on the analysis of the state of oil. *Uspekhi sovremennoy nauki i obrazovaniya*. 2017. V. 5. No 2, pp. 50–54. (In Russian).

4. Patent RF 2677490. *Sposob i ustroystvo dlya kontrolya sostoyaniya dinamicheskogo oborudovaniya* [Method and device for monitoring the state of dynamic equipment]. Nigmatullin R.G. Nigmatullin V.R. Nigmatullin I.R., Peletskiy S.S., Fiofanov K.N., Akhmetov A.I., Khamidullin R.G. Declared 14.10.2016. Published 17.01.2019. Bulletin No 2.

5. Migranov M.Sh., Nigmatullin R.G., Salakhov T.Z., Khamidullin R.G., Migranov A.M. Current diagnostics of equipment with an innovative device. *Mekhanika i fizika protsessov na poverkhnosti tverdykh tel, detaley tekhnologicheskogo i energeticheskogo oborudovaniya*. 2017. No 10, pp. 68–71. (In Russian).

6. Khabibullina G.R., Akhmetova V.R., Fedotova E.S., Nigmatullin V.R., Nigmatullin R.G., Ibragimov A.G. Antiwear and extreme pressure properties of N-substituted dithiazacycloalkanes in mineral oils. *Neftekhimiya*. 2016. V. 56. No 6, pp. 662–665. (In Russian).

7. Kuksenova L.I., Lapteva V.G., Kolmakov A.G., Rybakova L.M. *Metody ispytaniy na treniye i iznos* [Test methods for friction and wear]. Moscow: Intermet Engineering, 2001. 151 p.

8. Petrovskaya A.V., Khatipov S.A. Tribological Properties of Nanomodified composite materials based on polytetrafluoroethylene. *Materialovedeniye*. 2011. No 4, pp. 49–52. (In Russian).

9. Nigmatullin R.G. Digital analytical system of ООО «Himmotolog». *ABS-Avto*. 2017. No 12, pp. 34–37. (In Russian).

Поступила в редакцию/received: 12.02.2021; после рецензирования/revised: 28.03.2021;
принята/accepted: 31.03.2021

ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПАЗА ШАРНИРНОЙ ВИЛКИ

А.П. АРХАРОВ, канд. техн. наук

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

© Архаров А.П., 2021

Отмечена актуальность темы, которой посвящены выполненные разработки. Проведен анализ известных способов и устройств для измерения параметров пазов, не сопряженных с базовой поверхностью детали. Выявлены их существенные недостатки. Приведено описание предложенных способа и устройства для измерения пазов у шарнирной вилки. Проведен сравнительный анализ разработанных способа и устройства с аналогичными известными решениями. Отражены оригинальность разработок и достигаемый технический результат.

Ключевые слова: измерение, паз, вилка, точность, расположение, способ, устройство.

DOI: 10.46573/2658-5030-2021-39-44

ВВЕДЕНИЕ

В изделиях машиностроения встречаются механизмы, в составе которых применяются шарнирные вилки. Особенностью конструкции таких деталей является наличие пазов, не сопряженных с базовой поверхностью – цилиндрическим хвостовиком. На технологические и эксплуатационные показатели изделий с подобными деталями влияют такие параметры шарнирных вилок, как отклонение от симметричности пазов относительно оси хвостовика, отклонение ширины пазов. Контроль этих параметров чаще всего проводится альтернативным методом, не дающим количественной оценки несоответствия требованиям к детали и не позволяющим быстро скорректировать параметры технологического процесса и тем самым избежать последующего брака [1, 2]. Другой метод определения годности деталей по вышеупомянутым параметрам – измерение этих параметров. Шарнирную вилку можно измерить на координатно-измерительной машине [3, 4]. Однако, обладая высокой точностью и возможностями измерения различных деталей, такой способ имеет ограниченное применение из-за его высокой стоимости.

Существуют способ и устройство для измерения отклонения расположения пазов, выполненного на торце втулки [5]. Однако они не могут быть использованы при измерении пазов шарнирной вилки. Это связано с необходимостью иного базирования шарнирной вилки и другого размещения измерительного устройства, чем в известных способе и устройстве. По этим же причинам не могут быть использованы известные способ и устройство [5, 6] для измерения пазов на торце вала.

Существуют способ [7] и устройство [8] для измерения геометрических параметров корпусных деталей. Одним из таких параметров является симметричность пазов, не сопряженных с отверстием корпусной детали, относительно торцов ступицы. Базирование подобной детали выполняется по одному из торцов и отверстию. В то же время шарнирная вилка не содержит конструктивных элементов в виде отверстия и

ступицы, а расположение паза задается относительно оси ее хвостовика. Поэтому указанные способ и устройство не могут быть применены для измерения шарнирной вилки. Целью работы является разработка способа и устройства для измерения параметров паза шарнирной вилки с достижением при этом повышения точности измерения.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для проверки новизны предлагаемых решений применялся структурный анализ используемых на практике, описанных в научной литературе и в патентной документации способов и устройств для измерения параметров пазов, не сопряженных с базовой поверхностью детали. При разработке новых способа и измерительного средства применялся синтез таких элементов, которые в совокупности образуют единое целое, отвечающее критерию оригинальности.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Решение поставленной цели достигнуто в разработанном способе измерения параметров паза шарнирной вилки. Его основу составляет способ измерения параметров паза, не сопряженного с отверстием детали [9].

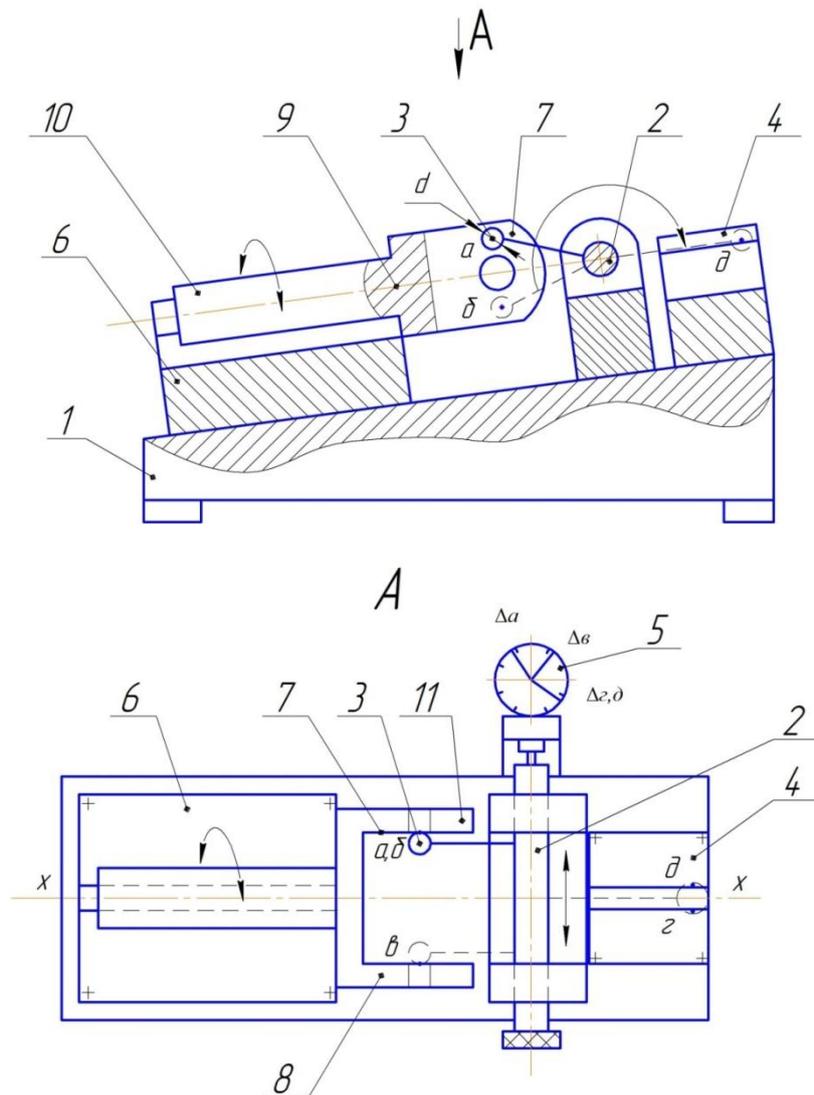
Разработанный способ заключается в следующем: шарнирную вилку базируют в наклонном корпусе путем установки ее хвостовой частью на базирующую призму с размещением ее ушек между базирующей и установочной призмами, обеспечивая при этом контакт измерительного щупа с одной из боковых поверхностей проверяемого паза. Взаимное угловое положение шарнирной вилки и наклонного корпуса выверяют путем возвратно-поворотных движений шарнирной вилки вокруг продольной оси хвостовой части на базирующей призме и щупа со штоком вокруг продольной оси упомянутого штока. Возвратно-поворотные движения измерительного щупа со штоком осуществляют в плоскости, параллельной общей биссекторной плоскости базирующей и установочной призм, достигая при этом неизменности показаний отсчетной головки при касании измерительного щупа с боковой поверхностью паза в двух крайних точках в направлении длины. Снимают первый отсчет. Вводят измерительный щуп в контакт с другой боковой поверхностью, снимают второй отсчет. Поворачивают измерительный щуп вокруг продольной оси штока и перемещают его вдоль этой оси, добиваясь центрирования измерительного щупа по установочной призме путем одновременного касания боковой рабочей поверхности щупа с рабочими поверхностями установочной призмы. Снимают третий отсчет. По разнице первых двух отсчетов и с учетом диаметра щупа определяют ширину паза, а по полуразности двух размахов, вычисленных соответственно по разностям первого и третьего, второго и третьего отсчетов, определяют отклонение от симметричности.

Сравнение разработанного способа с описанным в [9] показывает следующее: в разработанном способе шарнирную вилку базируют путем установки ее на базирующую призму, размещенную относительно установочной призмы с образованием общей биссекторной плоскости. Это позволяет расположить ось базовой поверхности шарнирной вилки в упомянутой плоскости. В известном способе базирование выполняется установкой объекта измерения торцом ступицы на установочную плоскость с прилеганием отверстия объекта измерения к центрирующим

пальцам. Такое базирование не обеспечивает расположения продольной оси базового отверстия в биссекторной плоскости установочной призмы. Сравнение рассматриваемых способов базирования показывает, что точность базирования, а значит, и точность измерения будет выше в разработанном способе. Кроме того, взаимодействие измерительного щупа с крайними точками боковой поверхности паза в направлении его длины обеспечивает возможность выверки углового положения шарнирной вилки в указанном способе.

Для осуществления предложенного способа разработано устройство для измерения параметров паза, не сопряженного с отверстием детали [10].

На рисунке показана общая схема устройства.



Общая схема устройства для измерения параметров паза шарнирной вилки

Устройство содержит наклонный корпус 1; шток 2, установленный на наклонном корпусе с возможностью поступательного движения вдоль своей продольной оси и возвратно-поворотных движений вокруг нее; измерительный щуп 3, выполненный с шарообразной боковой поверхностью и жестко закрепленный на штоке; установочную призму 4 с рабочими поверхностями, закрепленную на наклонном корпусе, выполненную и размещенную с возможностью центрирования по ее рабочим

поверхностям боковой шарообразной поверхности измерительного щупа; отсчетный узел 5, установленный на наклонном корпусе с возможностью взаимодействия своим измерительным наконечником со штоком, и базирующую призму 6, закрепленную на наклонном корпусе и размещенную относительно установочной призмы по другую сторону от продольной оси штока. Биссекторные плоскости упомянутых призм и расположены в общей биссекторной плоскости X-X. Шток размещен с возможностью касания упомянутой поверхности измерительного щупа с боковыми поверхностями 7 и 8 паза в их крайних в направлении длины паза точках a и b и расположен перпендикулярно своей продольной осью к общей биссекторной плоскости X-X. Шарнирная вилка 9 содержит хвостовую часть 10 и ушки 11.

Настройка устройства производится по образцовой детали.

Устройство работает следующим образом: при измерении на базирующую призму 6 устанавливают шарнирную вилку хвостовой частью с размещением ушек упомянутой вилки между базирующей и установочной призмами. При установке обеспечивают контакт измерительного щупа с боковой поверхностью 7 проверяемого паза. Угловое положение шарнирной вилки на наклонном корпусе выверяют путем возвратно-поворотных движений упомянутой вилки вокруг ее продольной оси на базирующей призме и возвратно-поворотных движений штока с измерительным щупом вокруг продольной оси упомянутого штока. Выверкой достигают неизменности показаний отсчетного узла при касании измерительного щупа боковой поверхностью 7 в двух крайних точках – a и b – в направлении длины паза. Снимают первый отсчет Δ_a отсчетного узла. Вводят измерительный щуп в контакт с боковой поверхностью 8 проверяемого паза в точке e , снимают второй отсчет Δ_e упомянутого узла. Поворачивают измерительный щуп со штоком вокруг продольной оси упомянутого штока и перемещают их вдоль этой оси, добиваясь центрирования измерительного щупа по установочной призме путем одновременного касания его боковой рабочей поверхности с рабочими поверхностями упомянутой призмы в точках c и d , снимая при этом третий отсчет отсчетного узла Δ_{cd} . Ширину проверяемого паза B находят по формуле

$$B = (\Delta_a - \Delta_e) + d,$$

где Δ_a – первый отсчет; Δ_e – второй отсчет; d – диаметр измерительного щупа.

Определяют первый размах W_1 по разнице первого Δ_a и третьего Δ_{cd} отсчетов, второй размах W_2 – по разнице второго Δ_e и третьего Δ_{cd} отсчетов, а отклонение от симметричности $\Delta_{сим}$ – по формуле $\Delta_{сим} = (W_1 - W_2)/2$.

Сравнение разработанного устройства с известным [10] показывает, что они различаются базирующими элементами, а также выполнением и размещением измерительного щупа. Оснащение разработанного устройства базирующей призмой и ее размещение относительно установочной призмы с образованием общей биссекторной плоскости позволяют расположить ось базовой поверхности шарнирной вилки в упомянутой плоскости. В то же время в указанном известном устройстве установочная плоскость, на которую объект измерения устанавливается ступицей, и центрирующие пальцы, к которым отверстием прилегает объект измерения, не обеспечивают расположение оси базового отверстия в биссекторной плоскости установочной призмы. Сравнение базирующих элементов показывает, что в разработанном устройстве упомянутые элементы повышают точность базирования, а значит, и точность измерения. Кроме того, измерительный щуп выполнен и размещен в устройствах с возможностью взаимодействия с двумя крайними точками боковой

поверхности паза: в известном – в направлении глубины паза, а в разработанном – в направлении длины паза. Такие конструктивные особенности разработанного устройства позволяют при его использовании выверить угловое положение шарнирной вилки и решить поставленную задачу.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный структурный анализ способов и средств, используемых при измерении пазов, не сопряженных с базовой поверхностью детали, а также известных из литературных источников и патентной документации, выявил их ограниченные технологические возможности, а в некоторых случаях – снижение точности измерения. Разработанный способ и устройство позволяют устранить отмеченные недостатки и могут быть использованы на машиностроительных предприятиях при измерении отклонений от симметричности и ширины пазов шарнирных вилок.

ЛИТЕРАТУРА

1. Палей М.А., Романов А.Б., Брагинский В.А. Допуски и посадки: справочник. В 2 ч. СПб.: Политехника, 2009. Ч. 1. 530 с.
2. Зайцев С.А., Грибанов Д.Д., Толстов А.Н., Меркулов Р.В. Контрольно-измерительные приборы и инструменты: учебник. М.: Академия, 2009. 462 с.
3. Единая система допусков и посадок СЭВ в машиностроении и приборостроении: справочник. В 2 ч. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Изд-во стандартов, 1989. Т. 2: Контроль деталей, 208 с.
4. Балонкина И.И., Кутай А.К., Сорочкин Б.М., Тайц Б.А. Точность и производственный контроль в машиностроении: справочник, под общ. ред. А.К. Кутая, Б.М. Сорочкина. Л.: Машиностроение, 1983. 368 с.
5. Архаров А.П., Боярчук Б.Ю. Измерение параметров паза на торце втулки // *Вестник Тверского государственного технического университета*. 2018. № 1 (33). С. 53–56.
6. Архаров А.П. Измерение параметров паза на торце вала // *Вестник Тверского государственного технического университета*. 2016. № 1 (29). С. 19–21.
7. Архаров А.П., Зыков Д.Ю. Способ измерения параметров паза и ступицы на корпусных деталях // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2019. № 1 (1). С. 21–25.
8. Патент РФ 2693882. *Устройство для измерения параметров паза и ступицы корпусной детали* // Архаров А.П. Заявл. 15.10.2018. Опубл. 05.07.2019, Бюл. № 19.
9. Архаров А.П. Измерение параметров паза, не сопряженного с отверстием детали // *Вестник Тверского государственного технического университета*. 2015. № 1 (27). С. 71–73.
10. Патент РФ 2559169. *Устройство для измерения паза, не сопряженного с отверстием детали* // Архаров А.П., Любимов К.С. Заявл. 20.05.2014. Опубл. 10.08.2015, Бюл. № 22.

Для цитирования: Архаров А.П. Измерение параметров паза шарнирной вилки // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2021. № 2 (10). С. 39–44.

HINGED FORK GROOVE PARAMETERS MEASURING

A.P. ARKHAROV, Cand. Sc.

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

The relevance of the research topic is noted. Analysis of the known methods and devices for measuring the parameters of grooves that are not conjugated with the base surface of the part is done. Significant deficiencies are identified. The description of the proposed method and device for hinged fork groove measuring is given. Comparative analysis of the developed method and device with similar known designs and solutions are carried out. The development originality and the achieved technical result are reflected in this work.

Keywords: measurement, groove, fork, accuracy, positioning, method, device.

REFERENCES

1. Paley M.A., Romanov A.B., Braginskiy V.A. Dopuski i posadki: Spravochnik v 2 ch. [Adjustments and allowances: directory in 2 parts]. St. Peterburg: Politehnika, 2009. Part 1, 530 p.
2. Zaitsev S.A., Griбанov D.D., Tolstov A.N., Merkulov R.V. Kontrolno-izmeritelnye pribory i instrumenty: uchebnik [Control and measuring devices and tools: textbook]. Moscow: Akademiya, 2009. 462 p.
3. Edinaya Sistema dopuskov i posadok SEV v mashinostroenii i priborostroenii spravochnik v 2 ch. [Unified system of adjustments and allowances CMEA in mechanical engineering and instrument making. Directory in 2 parts]. Moscow: Izd-vo standartov, 1989, part 2, Kontrol detaley [Control of parts], 208 p.
4. Tochnost i proizvodstvennyy kontrol v mashinostroyenii: Spravochnik [Accuracy and production control in mechanical engineering: Handbook]. I.I. Balonkina, A.K. Kutai, B.M. Sorochkin, B.A. Taits; under total. ed. A.K. Kutai, B.M. Sorochkin. Leningrad: Mashinostroenie, 1983. 368 p.
5. Arkharov A.P., Boyarchuk B.Y. Measuring the parameters of groove at the bushing end. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2018. No 1 (33), pp. 53–56. (In Russian).
6. Arkharov A.P. Method to measure parameters of groove on shaft end face. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2016. No 1 (29), pp. 19–21. (In Russian).
7. Arkharov A.P., Zykov D.Y. Method of measurement of groove and body part hub. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki*. 2019. No 1 (1), pp. 21–25. (In Russian).
8. Patent RF 2693882 *Ustroistvo dlya izmereniya parametrov paza I stupici korpusnoi detali* [Device for measuring parameters of groove and hub of structural part]. Arkharov A.P. Declared 15.10.2018. Published 05.07.2019, Bulletin No 19.
9. Arkharov A.P. Method to measure parameters of groove mismatched with part bore. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2015. No 1 (27), pp. 71–73. (In Russian).
10. Patent RF 2559169 *Ustroistvo dlya izmereniya paza, nesopryazhennogo s otverstiem detali* [Device for parameters measurement of slot not aligned with part hole]. Arkharov A.P., Ljubimov K.S. Declared 20.05.2014. Published 10.08.2015, Bulletin No 22.

Поступила в редакцию/received: 14.12.2020; после рецензирования/revised: 03.03.2021;
принята/accepted: 09.03.2021

*Вестник Тверского государственного технического университета.
Серия «Технические науки». № 2 (10), 2021*

КОНТРОЛЬ КРИСТАЛЛОГРАФИЧЕСКОЙ ТЕКСТУРЫ СТАЛЬНОГО ЛИСТОВОГО ПРОКАТА С ПОМОЩЬЮ ПЛЕНОЧНЫХ МАГНИТОЭЛАСТОВ И МАГНИТНОЙ СУСПЕНЗИИ

С.Е. ИЛЬЯШЕНКО, канд. физ.-мат. наук, Л.Е. АФАНАСЬЕВА, канд. физ.-мат. наук

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

© Ильяшенко С.Е., Афанасьева Л.Е., 2021

Представлены результаты экспериментальных исследований кристаллографической текстуры стального листового проката по анизотропии магнитных параметров. Для визуализации магнитных полей рассеяния использовали пленочные магнитоэласты и магнитную суспензию. Показано, что контраст изображений ромба Корзунина над стальным листом с ребровой текстурой в магнитоэластах с микрокапсулированной магнитной жидкостью сравним с контрастом, достигаемым с помощью жидких магнитных суспензий. Данные индикаторы поля можно использовать для качественного обнаружения анизотропии в листовых материалах и определения осей легкого намагничивания.

Ключевые слова: стальной листовой прокат, текстура, анизотропия, ромб Корзунина, магнитоэласт, ферромагнитная суспензия.

DOI: 10.46573/2658-5030-2021-45-50

ВВЕДЕНИЕ

От кристаллографической текстуры, под которой понимается преимущественная пространственная ориентация зерен в поликристалле, зависят механические и физические свойства металлов [1–4]. Например, известно, что железо и его сплавы имеют максимальную прочность вдоль кристаллографических направлений $\langle 111 \rangle$, а наименьшую – вдоль $\langle 100 \rangle$. Создание совершенной кристаллографической текстуры позволяет повысить эксплуатационные характеристики сплавов. Часто при изготовлении деталей возникает и обратная задача – получение изотропного материала, не обладающего текстурой. В связи с этим важной задачей является разработка неразрушающих методов контроля, позволяющих устанавливать тип и степень совершенства кристаллографической текстуры материала.

Зависимость магнитных структурно-чувствительных параметров от кристаллографической анизотропии дает возможность использовать их для текстурного анализа. Г.С. Корзуниным разработан новый неразрушающий магнитопорошковый способ обнаружения текстуры в листовых материалах [1–3] и созданы магнитные текстурометры, не имеющие мировых аналогов и позволяющие определять кристаллографическую текстуру в движущейся полосе электротехнической стали. Суть обнаруженного эффекта состоит в том, что геометрия индикаторных рисунков полей рассеяния, полученных при намагничивании листового материала намагничивающей системой (полюсом постоянного магнита или электромагнита) перпендикулярно плоскости листа, соответствует типу текстуры испытуемого материала. Над изотропным листом наблюдается круг, над кубической текстурой – квадрат [1]. Над образцом с ребровой текстурой появляется четкий ромб, форма которого (отношение длин диагоналей) не зависит от формы намагничивающего полюса [1–3]. Направление большей диагонали ромба всегда совпадает с направлением легкого намагничивания.

Магнитопорошковая дефектоскопия является широко распространенным стандартизованным методом неразрушающего контроля качества стальных деталей и инструмента [5]. Разработанная номенклатура водных и масляных магнитных суспензий на основе оксидов железа обеспечивает высокую чувствительность метода. Вместе с тем операции нанесения суспензии на контролируемое изделие путем окунания или поливом с помощью шланга не технологичны и ограничивают производительность труда контролера.

В данной статье для магнитного контроля кристаллографической текстуры стального листового проката предлагается использовать визуализирующие эластичные полимерные пленки, импрегнированные микрокапсулированной магнитной жидкостью. При микрокапсулировании [6, 7] микрокапли магнитной жидкости заключаются в тонкую оболочку, масса которой составляет малую долю (единицы процентов) от общей массы. Микрокапсулирование сводится к диспергированию магнитной жидкости в подходящей жидкой или газовой среде с последующим покрытием капель оболочкой – слоем капсулирующего вещества. Жидкая оболочка микрокапсул затем подвергается отверждению под действием температуры или химических реагентов. В настоящее время выпуск этих индикаторов поля освоен промышленностью и они находят практическое применение.

Цель работы: оценить возможности контроля кристаллографической текстуры стального листового проката с помощью пленочного магнитоэласта и магнитной суспензии.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В качестве образцов для исследования использовали анизотропные листы трансформаторной стали толщиной 0,4 мм.

Для визуализации индикаторного рисунка, отражающего анизотропию магнитных характеристик листового ферромагнитного материала, применяли пленочный магнитоэласт [7] и магнитную суспензию на магнетитовой основе.

Магнитную суспензию наносили на поверхность стального листа, пленочный магнитоэласт прикладывали к сухой чистой поверхности образца без дополнительного прижатия. Намагничивающей системой служил цилиндрический постоянный магнит ($\varnothing 6 \times 12$ мм), который помещали с обратной стороны листа. Величину зазора L между магнитом и образцом изменяли от 3 до 0 мм с шагом 1 мм.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Механизм формирования оптического контраста в магнитных суспензиях связан с возникновением силы \mathbf{F} взаимодействия между отдельной частицей и источником неоднородного поля, $\mathbf{F} = \mathbf{A}\chi V$, где $\mathbf{A} = B \frac{d\mathbf{B}}{dr} \frac{\mathbf{r}}{r}$ (\mathbf{r}/r – единичный вектор, направленный в сторону наибольшего изменения магнитной индукции B); χ – магнитная восприимчивость. Под действием этой силы частицы суспензии перемещаются и концентрируются в областях с наибольшим градиентом поля. Области с большой концентрацией частиц становятся менее прозрачными и поэтому при визуальном наблюдении выглядят более темными [8, 9].

На рис. 1 представлены изображения индикаторных рисунков из ферромагнитной суспензии, полученных на листе стали при различных значениях зазора L . Следует отметить высокую разрешающую способность и визуализирующие возможности этого индикатора поля. На всех четырех частях рисунка прослеживается изображение ромба Корзунина, по которому несложно определить направление

большей диагонали. При уменьшении зазора между постоянным магнитом и образцом до 1...0 мм дополнительно выявляются границы зерен.

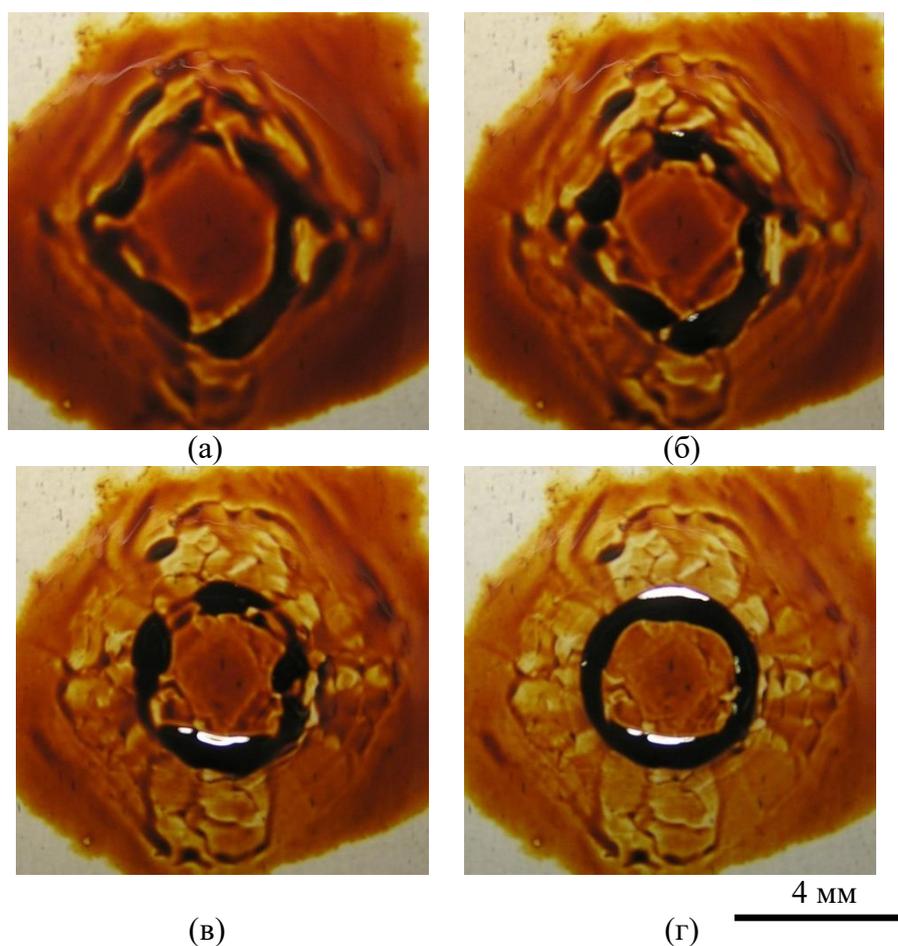


Рис. 1. Эволюция ромба Корзунина при изменении расстояния L между образцом и магнитом: $L = 3$ (а), 2 (б), 1 мм (в); нулевой зазор (г); индикатор – магнитная суспензия

Механизм формирования оптического контраста в испытуемых магнитоэластах отличается от контраста, возникающего в традиционных магнитных суспензиях [8–11]. В магнитоэластах описанный выше механизм формирования оптического контраста практически не действует, так как перемещение частиц ограничено оболочкой капсул. Оптический контраст в данном случае можно объяснить образованием под действием внешнего поля изолированных друг от друга цепочек частиц, ориентирующихся вдоль силовых линий. Как показано в работе [6], такие цепочки обуславливают высокую прозрачность композита по сравнению с исходным неориентированным состоянием.

Магнитоэласты обладают меньшей разрешающей способностью, чем магнитные суспензии. Этот индикатор поля чувствителен к величине зазора между листом и постоянным магнитом. При значении $L = 3$ мм ромб Корзунина незаметен. При нулевом зазоре он вырождается в круг, отражая форму постоянного магнита (рис. 2). При данных условиях эксперимента оптимальной для анализа текстуры является величина зазора 1...2 мм.

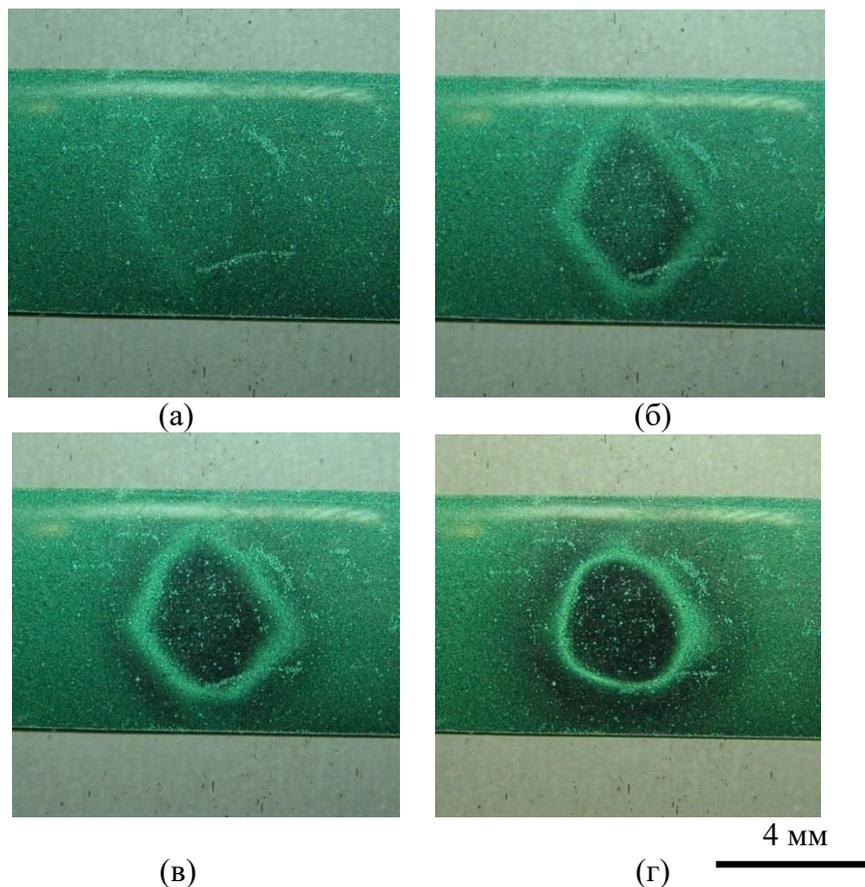


Рис. 2. Эволюция ромба Корзунина при изменении расстояния L между образцом и магнитом: $L = 3$ (а), 2 (б), 1 мм (в); нулевой зазор (г); индикатор – магнитоэласт

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования показали, что контраст изображений ромба Корзунина над стальным листовым прокатом с ребровой текстурой, полученных в магнитоэластах с микрокапсулированной магнитной жидкостью, сравним с контрастом, достигаемым с помощью жидких магнитных суспензий. Данные индикаторы поля можно использовать для качественного обнаружения анизотропии в листовых материалах и определения осей легкого намагничивания.

Пленочные магнитоэласты обладают достаточно хорошими визуализирующими возможностями. Эти пленки являются многоцветными. Благодаря эластичности с их помощью можно контролировать кривые поверхности, вырезать нужного размера и геометрической формы без ущерба качеству. Пленки данного вида удобны в эксплуатации и перспективны для проведения экспресс-контроля в полевых или цеховых условиях и при обследовании крупногабаритных стальных конструкций. Использование пленочных магнитоэластов с микрокапсулированной магнитной жидкостью в качестве индикаторных сред расширяет функциональные возможности магнитопорошковой дефектоскопии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Корзунин Г.С. Магнитные методы определения кристаллической текстуры. Екатеринбург: УрО РАН, 1995. 128 с.
2. Дякин В.В., Корзунин Г.С., Литвиненко Л.А., Кайбичева С.Л. О магнитопорошковом методе контроля кристаллографической текстуры электротехнической стали // *Дефектоскопия*. 2004. № 5. С. 63–78.

3. Горкунов Э.С., Задворкин С.М., Худорожкова Ю.В., Корзунин Г.С. Влияние типа кристаллографической текстуры на анизотропию параметров магнитных полей рассеяния стального листового проката // *Физическая мезомеханика*. 2019. Т. 22. № 3. С. 54–64.

4. Матюк В.Ф. Состояние неразрушающего контроля штампуемости листового проката сталей // *Неразрушающий контроль и диагностика*. 2012. № 3. С. 15–42.

5. Неразрушающий контроль: справочник: в 8 т. / под общ. ред. В.В. Клюева. М.: Машиностроение, 2006. Т. 4. 736 с.

6. Jin S., Tiefel T.N., Wolfe R. Directionally-conductive, optically-transparent composites by magnetic alignment // *IEEE transactions on magnetics*. 1992. V. 28. № 5. P. 2211–2213.

7. Ardizzone V.A. Viewing film for dc magnetic fields. URL: <http://amasci.com/amateur/magnerite.html> (дата обращения: 22.03.2021).

8. Гречишкин Р.М., Гусев М.Ю., Чигиринский С.А., Ильяшенко С.Е., Афанасьева Л.Е., Мамкина Н.О. Магнитооптические твердотельные индикаторные среды и их технические применения // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-техн. журнал)*. 2007. № S2. С. 99–110.

9. Grechishkin R., Chigirinsky S., Gusev M., Cugat O., Dempsey N.M. Magnetic imaging films. В. Azzarboni et al. (eds.). *Magnetic Nanostructures in Modern Technology*. Springer, Dordrecht, 2008. P. 195–224.

10. Гасанов О.В., Иванова А.И., Афанасьева Л.Е., Калимуллина Э.Т., Гречишкин Р.М. Электронно-микроскопический контроль доменной структуры и полей рассеяния магнитных элементов МЭМС // *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*. 2015. № 9. С. 54–57.

11. 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.

Для цитирования: Ильяшенко С.Е., Афанасьева Л.Е. Контроль кристаллографической текстуры стального листового проката с помощью пленочных магнитоэластов и магнитной суспензии // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2021. № 2 (10). С. 45–50.

CONTROL OF THE CRYSTALLOGRAPHIC TEXTURE OF STEEL SHEETS USING FILM MAGNETOELASTS AND MAGNETIC SUSPENSION

S.E. ILYASHENKO, Cand. Sc., L.E. AFANASIEVA, Cand. Sc.

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

The results of experimental studies of the crystallographic texture of steel sheet products by the anisotropy of magnetic parameters are presented. To visualize the stray magnetic fields, we used film magnetoelasts and a magnetic suspension. It is shown that the contrast of images of a Korzunin rhombus above a steel sheet with a ribbed texture in magnetoelasts with a microencapsulated magnetic fluid is comparable to the contrast achieved

with liquid magnetic suspensions. These field indicators can be used to qualitatively detect anisotropy in sheet materials and determine the axes of easy magnetization.

Keywords: steel sheet products, texture, anisotropy, Korzunin's rhombus, magnetoelast, ferromagnetic suspension.

REFERENCES

1. Korzunin G.S. Magnitnyye metody opredeleniya kristallicheskoy tekstury [Magnetic methods for determining the crystal texture]. Yekaterinburg: UrO RAN, 1995. 128 p.
2. Dyakin V.V., Korzunin G.S., Litvinenko L.A., Kaibicheva S.L. On the magnetic particle method for controlling the crystallographic texture of electrical steel. *Defektoskopiya*. 2004. No 5, pp. 63–78. (In Russian).
3. Gorkunov E.S., Zadvorkin S.M., Khudorozhkova Yu.V., Korzunin G.S. Influence of the type of crystallographic texture on the anisotropy of the parameters of magnetic scattering fields of steel sheet metal. *Fizicheskaya mezomekhanika*. 2019. V. 22. No 3, pp. 54–64. (In Russian).
4. Matyuk V.F. The state of non-destructive testing of the stamping ability of steel sheets. *Nerazrushayushchiy kontrol i diagnostika*. 2012. No 3, pp. 15–42. (In Russian).
5. Nerazrushayushchiy kontrol: spravochnik: v 8 t. [Non-destructive testing: Handbook: in 8 v.], under total. ed. V.V. Klyuev. Moscow: Mashinostroenie, 2006. V. 4. 736 p.
6. Jin S., Tiefel T.N., Wolfe R. Directionally-conductive, optically-transparent composites by magnetic alignment. *IEEE transactions on magnetics*. 1992. V. 28. No 5, pp. 2211–2213.
7. Ardizzone V.A. Viewing film for dc magnetic fields. URL: <http://amasci.com/amateur/magnerite.html> (date accessed: 22.03.2021).
8. Grechishkin R.M., Gusev M.Yu., Chigirinsky S.A., Ilyashenko S.E., Afanasieva L.E., Mamkina N.O. Magneto-optical solid-state indicator media and their technical applications. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten (nauchno-tekhn. zhurnal)*. 2007. No S2, pp. 99–110. (In Russian).
9. Grechishkin R., Chigirinsky S., Gusev M., Cugat O., Dempsey N.M. Magnetic imaging films. B. Azzerboni et al. (eds.). *Magnetic Nanostructures in Modern Technology*. Springer, Dordrecht, 2008, pp. 195–224.
10. Gasanov O.V., Ivanova A.I., Afanasieva L.E., Kalimullina E.T., Grechishkin R.M. Electron-microscopic control of the domain structure and stray fields of magnetic elements of MEMS. *Poverkhnost. Rentgenovskiy, sinkhrotronnyy i neytronnyy issledovaniya*. 2015. No 9, pp. 54–57. (In Russian).
11. Afanasieva L.E., Ziegert A.D., Ivanova A.I., Grechishkin R.M. Magneto-optical visualization of defects in welded joints. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya «Tekhnicheskiye nauki»*. 2020. No 1 (5), pp. 13–20. (In Russian).

Поступила в редакцию/received: 21.03.2021; после рецензирования/reviced: 25.03.2021; принята/accepted: 31.03.2021

ТРАНСПОРТНОЕ, ГОРНОЕ И СТРОИТЕЛЬНОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 622.331.002.5

РАСЧЕТ МОМЕНТА СОПРОТИВЛЕНИЯ ФРЕЗЕРОВАНИЮ ТОРФЯНОЙ ЗАЛЕЖИ ПРИ ПОПАДАНИИ ФРЕЗЫ НА ПЕНЬ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ АКТИВНОЙ ШИРИНЫ РАБОЧЕГО ОРГАНА

А.Л. ЯБЛОНЕВ, д-р техн. наук, Н.М. ЖУКОВ, аспирант

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

© Яблонев А.Л., Жуков Н.М., 2021

Одной из основных операций фрезерного способа добычи торфа является фрезерование. От качества его выполнения зависит сушка, а значит, и весь последующий технологический процесс производства. Наличие древесных включений в торфяной залежи сильно осложняет работу. Резко возросший момент нагружения, возникающий при попадании фрезы на пень, способен вывести из работоспособного состояния как элементы трансмиссии, так и привод фрезерующего агрегата. Поэтому на стадии проектирования необходимо учитывать динамические нагрузки, возникающие от встречи фрезы с древесными включениями. Попытки описать этот факт предпринимались ранее разными авторами, но в силу математических и методических ошибок не увенчались успехом. В данной статье сделана «работа над ошибками», которая позволила достичь необходимого результата.

Ключевые слова: фрезерование, торф, пнистость, древесное включение, фреза, нож фрезы, закон сохранения импульса, момент сопротивления фрезерованию, активная ширина фрезы.

DOI: 10.46573/2658-5030-2021-51-61

ВВЕДЕНИЕ

Фрезерование – один из ключевых и наиболее ответственных этапов при разработке торфяной залежи фрезерным способом. От качества его выполнения в целом зависит весь технологический цикл добычи фрезерного торфа, так как закладываются условия для последующей сушки расстила торфяной крошки [1].

Немаловажную роль в процессе фрезерования играет пнистость торфяной залежи, определяющая интенсивность столкновения фрезы с древесными включениями. При этом наблюдается мгновенное увеличение момента сопротивления фрезерованию и, соответственно, возросшие нагрузки во всей трансмиссии фрезерующего агрегата [2, 3]. Естественно, возникает вопрос о надежности и долговечности торфяных фрезерующих машин, которые значительно сокращаются [4]. Резко выраженный знакопеременный характер нагрузок способен молниеносно разрушить или вывести из работоспособного состояния рабочие и исполнительные органы, элементы трансмиссии и даже карданно-телескопическую передачу, по которой осуществляется передача крутящего момента от трактора-тягача к фрезерующему агрегату. Поэтому учет явлений столкновения с пнем совершенно

необходим на стадии проектирования машин. Кроме того, в случае косоугольного резания при расчете энергоемкости и мощности фрезерования требуется знать активную ширину рабочего органа (фрезы), взаимодействующего с торфяной залежью.

Указанные вопросы характерны не только для торфяной отрасли, но и для всех работ, связанных с фрезерованием грунта, дорожного полотна, горных пород, когда возникает встреча рабочего органа с более плотным и прочным включением [5].

Попытка теоретического рассмотрения вопроса столкновения фрезы с древесным включением в торфяной залежи уже была предпринята ранее [6, 7], однако в силу ошибок математического и методического характера не привела к успеху, поэтому в данной статье рассматривается вновь.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Опишем процесс послойно-поверхностного попутного фрезерования торфяной залежи фрезой, имеющей окружную скорость v и поступательную W (рис. 1). Для упрощения процесса взаимодействия фрезы радиусом R с древесным включением последнее считается жестко закрепленным в точке O . Под радиусом R понимается радиус инерции. Для полого тонкостенного цилиндра, каковым, по сути, и является фреза, радиус инерции равен радиусу наружной обечайки фрезы. От возникшего контакта фрезу подкидывает вверх, и она, подобно буксующему ведущему колесу, старается «переехать» через препятствие [8]. При этом фреза получает ударный импульс P , который раскладывается на две составляющие: горизонтальную и вертикальную, расположенные в направлении движения фрезера и вертикальной плоскости [9]. Контакт фрезы с пнем заканчивается через время Δt , с, когда радиус OC принимает вертикальное положение из-за поворота фрезы на некоторый угол α относительно оси, проходящей через точку O .

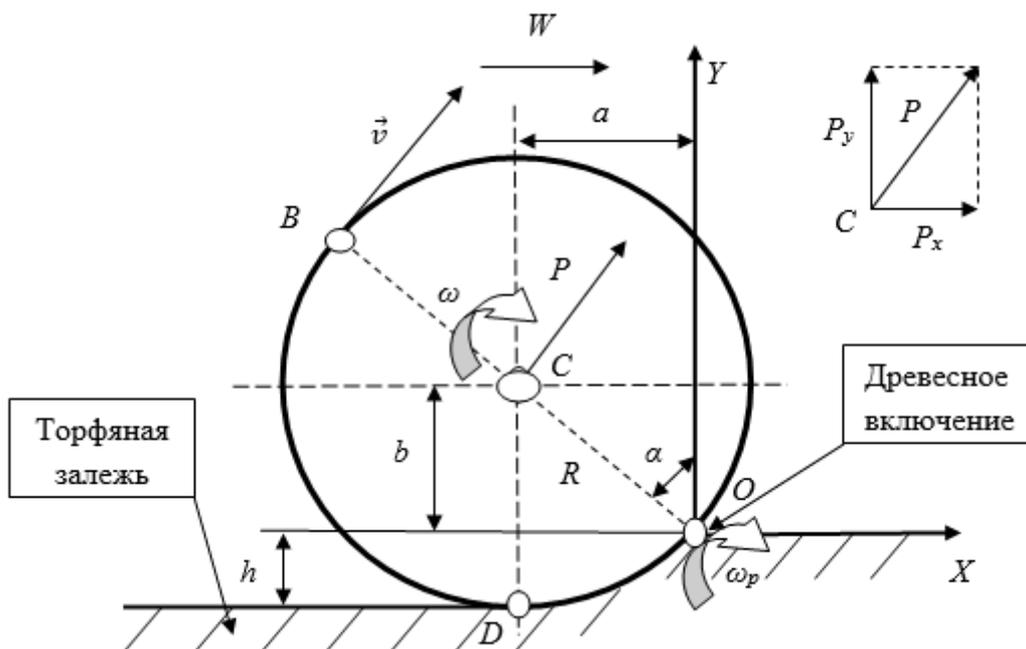


Рис. 1. Расчетная схема взаимодействия фрезы с закрепленным пнем

Согласно теореме об изменении количества движения

$$mv_{kx} - mv_{0x} = P_x; \quad (1)$$

$$mv_{ky} - mv_{0y} = P_y, \quad (2)$$

где m – масса фрезы, кг; v_{0x} и v_{0y} – начальные горизонтальная и вертикальная составляющие скорости центра тяжести C фрезы до удара, м/с; v_{kx} и v_{ky} – горизонтальная и вертикальная составляющие скорости центра тяжести C фрезы после удара, м/с; P_x и P_y – горизонтальная и вертикальная составляющая импульса, $[\text{кг}\cdot\text{м}/\text{с}] = [\text{кг}\cdot\text{м}\cdot\text{с}/\text{с}^2] = [\text{Н}\cdot\text{с}]$.

Соотношение между P_x и P_y можно получить из (1) и (2) через коэффициент q [10]:

$$q = P_x / P_y = \frac{(v_{kx} - v_{0x})}{(v_{ky} - v_{0y})}, \quad (3)$$

или

$$P_x = qP_y. \quad (4)$$

Тогда абсолютная величина импульса P выразится уравнением

$$P = \sqrt{P_y^2 + P_x^2} = \sqrt{P_y^2 + q^2 P_y^2} = P_y \sqrt{(1 + q^2)}. \quad (5)$$

Если до удара фреза вращалась относительно оси, проходящей через центр тяжести с угловой скоростью ω , с^{-1} , то поворот фрезы относительно оси, проходящей через точку O , осуществляется с некоторой угловой скоростью ω_p , с^{-1} . Согласно схеме, представленной на рис. 1, начальные и конечные скорости (до и после удара), входящие в (1) и (2):

$$v_{0x} = W, \quad (6)$$

так как до удара центр тяжести фрезы C двигался поступательно прямолинейно и равномерно со скоростью W ;

$$v_{0y} = 0, \quad (7)$$

поскольку до удара центр тяжести фрезы C не совершал движения в вертикальной плоскости;

$$v_{kx} = b\omega_p; \quad (8)$$

$$v_{ky} = a\omega_p, \quad (9)$$

где a и b – геометрические плечи (см. рис. 1), определяемые из простых геометрических соотношений и теоремы Пифагора:

$$b = R - h; \quad (10)$$

$$a = \sqrt{R^2 - b^2}, \quad (11)$$

где h – глубина фрезерования.

И до и после удара окружная скорость фрезы, в том числе в точке O , определялась угловой скоростью вращения фрезы ω и ее радиусом R :

$$v = \omega R. \quad (12)$$

В момент удара фреза начинает проворачиваться относительно оси, проходящей через точку O , скорость которой равна нулю. Следовательно, именно эта точка является мгновенным центром скоростей [8], исходя из чего окружная скорость точки B

$$v = 2\omega_p R, \quad (13)$$

откуда

$$\omega_p = \frac{v}{2R}. \quad (14)$$

С учетом (6–9) выражения (1) и (2) можно записать в следующем виде:

$$mb\omega_p - mW = m(b\omega_p - W) = P_x, \quad (15)$$

$$mv_{ky} = ma\omega_p = P_y. \quad (16)$$

Угол поворота фрезы, град., определяется из геометрического соотношения

$$\alpha = \arccos \frac{b}{R}. \quad (17)$$

Учитывая, что уже известны угловая скорость ω_p и угол поворота фрезы во время удара, можно рассчитать время удара:

$$\Delta t = \frac{\pi\alpha}{180\omega_p}. \quad (18)$$

Усилие, действующее на фрезу во время удара об закрепленный пень, Н:

$$F = P / \Delta t. \quad (19)$$

Момент, действующий на фрезу во время удара об пень, Н·м:

$$M_{уд} = FR. \quad (20)$$

Относительно постоянный момент, действующий на фрезу в процессе фрезерования равнопрочного монолита (торфа, чернозема, глины и т.д.), Н·м:

$$M_{\phi} = N_{\phi} R / v, \quad (21)$$

где N_{ϕ} – средняя мощность, Вт, необходимая для фрезерования равнопрочного монолита без включений.

Здесь следует сделать небольшое замечание. На самом деле вместо окружной скорости вращения фрезы в формуле (21) должна стоять геометрическая сумма окружной и поступательной скоростей фрезы, но поскольку окружная скорость намного больше поступательной ($v \gg W$), то она и принимается в качестве единственно параметра.

Коэффициент, учитывающий увеличение нагрузочного момента при встрече рабочего органа с древесными включениями k :

$$k = M_{уд} / M_{\phi}. \quad (22)$$

Фреза на агрегате может быть установлена не только перпендикулярно направлению поступательного перемещения, но и под углом, и при этом осуществлять при этом косоугольное резание. Такой случай характерен для высокоскоростных профилировщиков, удаляющих возникшие бровки с краев поверхностей картовых полей. При расчете энергоемкости и мощности фрезерования таким рабочим органом необходимо знать активную ширину захвата фрезы.

Рассмотрим схему, изображенную на рис. 2. Фреза длиной L , погружаясь в залежь, осуществляет фрезерование на глубину h . При этом R_n – радиус фрезы по концам режущих элементов (ножей). Объем фрезеруемого грунта определяется площадью сегмента ABD и активной шириной захвата фрезы.

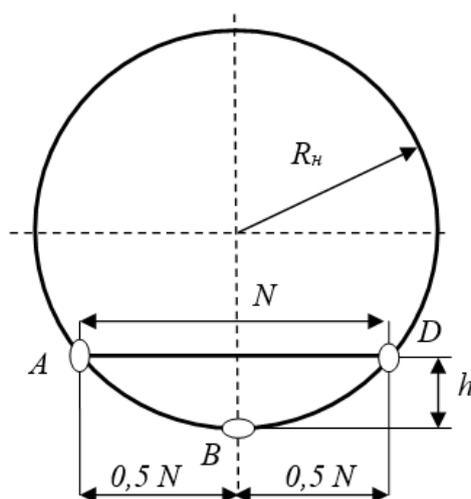


Рис. 2. Схема формирования сегмента фрезерования

Сегмент фрезерования образован, в свою очередь, высотой сегмента (глубиной фрезерования) h , длиной дуги ABD и хордой $[AD] = N$.

Из свойств кривых второго порядка [11]

$$h^2 - 2R_h h + \frac{N^2}{4} = 0, \quad (23)$$

откуда

$$N = \sqrt{8hR_h - 4h^2} = 2\sqrt{2hR_h - h^2}. \quad (24)$$

Если фреза установлена под углом α к оси, перпендикулярной скорости поступательного перемещения агрегата W , то расчетная схема формирования активной ширины захвата рабочего органа $L_{акт}$ будет выглядеть так, как это представлено на рис. 3.

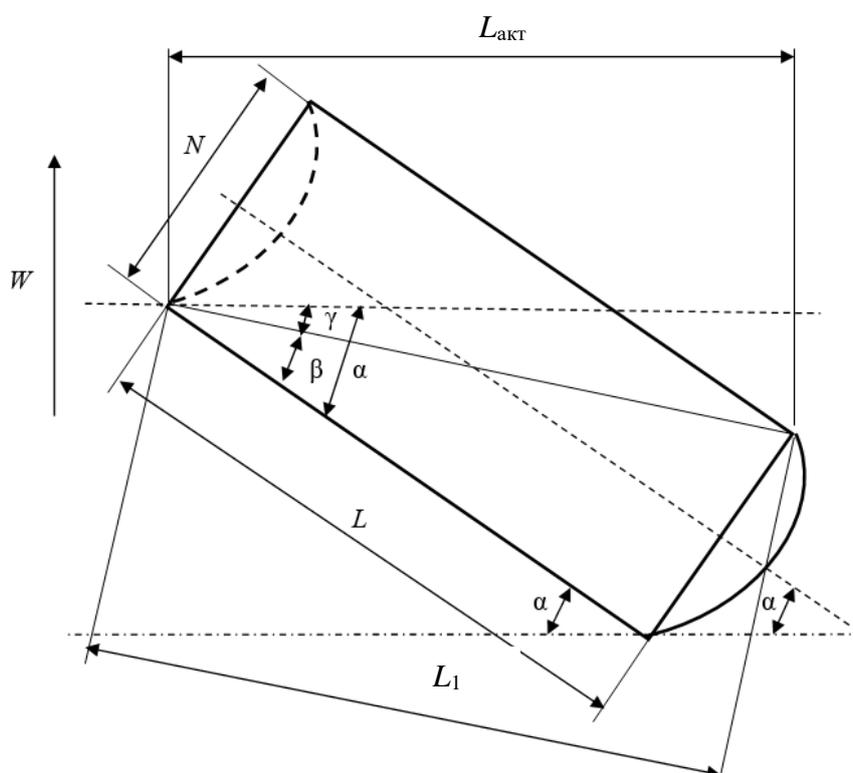


Рис. 3. Схема формирования активной ширины захвата фрезы

Наиболее простой способ определения активной ширины захвата фрезы (как это часто и делается) – воспользоваться формулой

$$L_{акт} = L \cos \alpha. \quad (25)$$

Однако даже беглый взгляд на рис. 3 покажет, что такой расчет носит весьма приблизительный характер. Очевидно, что

$$L_{акт} = L_1 \cos \gamma, \quad (26)$$

причем

$$L_1 = \frac{L}{\cos \beta}; \quad (27)$$

$$\gamma = \alpha - \beta; \quad (28)$$

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{N}{L} = \frac{2\sqrt{2hR_H - h^2}}{L}; \quad (29)$$

$$\beta = \operatorname{arctg} \frac{2\sqrt{2hR_H - h^2}}{L}. \quad (30)$$

Из (28) и (30) можно определить γ :

$$\gamma = \alpha - \operatorname{arctg} \frac{2\sqrt{2hR_H - h^2}}{L}. \quad (31)$$

Подставив (30) в (27), получим

$$L_1 = \frac{L}{\operatorname{cosarctg} \frac{2\sqrt{2hR_H - h^2}}{L}}. \quad (32)$$

И, наконец, подставив (31) и (32) в (26), окончательно имеем формулу для определения активной ширины захвата фрезы при косоугольном фрезеровании:

$$L_{\text{акт}} = \frac{L}{\operatorname{cosarctg} \frac{2\sqrt{2hR_H - h^2}}{L}} \cos \left(\alpha - \operatorname{arctg} \frac{2\sqrt{2hR_H - h^2}}{L} \right). \quad (33)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве примера приведем расчет динамических усилий, действующих на фрезу послойно-поверхностного фрезера типа МТФ-17 при встрече фрезы с закрепленным древесным включением. Исходные данные:

- масса фрезы $m = 440$ кг;
- наружный радиус обечайки фрезы $R = 0,17$ м;
- частота вращения фрезы относительно оси, проходящей через центр ее тяжести, $n = 514$ об/мин;
- поступательная скорость движения фрезера $W = 12$ км/ч = 3,33 м/с;
- глубина фрезерования $h = 0,011$ м;
- средняя мощность, необходимая для фрезерования монолита без включений, $N_{\phi} = 35$ кВт.

Необходимо определить коэффициент, учитывающий увеличение нагрузочного момента при встрече фрезы с древесным включением.

1. Начальная угловая скорость вращения фрезы, с^{-1} :

$$\omega = \pi n / 30 = 3,14 \cdot 514 / 30 = 53,8.$$

2. Начальные горизонтальная и вертикальная составляющие скорости центра тяжести фрезы до удара, м/с:

$$v_{0x} = W = 1,56;$$

$$v_{0y} = 0.$$

3. По формулам (10), (11) определим геометрические плечи контакта a и b , м:

$$b = R - h = 0,17 - 0,011 = 0,159;$$

$$a = \sqrt{R^2 - b^2} = \sqrt{0,17^2 - 0,159^2} = 0,06.$$

4. Из выражения (12) найдем окружную скорость вращения фрезы относительно оси, проходящей через центр ее тяжести, м/с:

$$v = \omega R = 53,8 \cdot 0,17 = 9,15.$$

5. При помощи формулы (12) рассчитаем угловую скорость вращения фрезы относительно оси, проходящей через жестко закрепленный пень, c^{-1} :

$$\omega_p = \frac{v}{2R} = \frac{9,15}{2 \cdot 0,17} = 26,91.$$

6. Из выражения (17) найдем угол поворота фрезы вокруг точки O при контакте с жестко закрепленным древесным включением, град.:

$$\alpha = \arccos \frac{b}{R} = \arccos \frac{0,159}{0,17} = 20,72.$$

7. По формуле (18) определим время удара, с:

$$\Delta t = \frac{\pi \alpha}{180 \omega_p} = \frac{3,14 \cdot 20,72}{180 \cdot 26,91} = 0,013.$$

8. По формулам (8, 9) рассчитаем конечные горизонтальная и вертикальная составляющие скорости центра масс фрезы после удара, м/с:

$$v_{kx} = b \omega_p = 0,159 \cdot 26,91 = 4,28;$$

$$v_{ky} = a \omega_p = 0,06 \cdot 26,91 = 1,61.$$

9. Из выражения (16) найдем вертикальную составляющую импульса при ударе, Н·с:

$$P_y = m v_{ky} = 440 \cdot 1,61 = 708,4.$$

10. По формуле (3) определим коэффициент q соотношения проекций импульса:

$$q = \frac{P_x}{P_y} = \frac{(v_{kx} - v_{0x})}{(v_{ky} - v_{0y})} = \frac{(4,28 - 1,56)}{(1,61 - 0)} = 1,69.$$

6. По формуле (5) рассчитаем абсолютную величину импульса, кН·с:

$$P = P_y \sqrt{(1 + q^2)} = 708,4 \sqrt{(1 + 1,69^2)} = 1\,391,08 \text{ Н} \cdot \text{с} \approx 1,39.$$

7. По формуле (19) определим усилие, действующее на фрезу во время удара, F , кН:

$$F = P/\Delta t = 1,39/0,013 = 106,92.$$

8. Из выражения (20) найдем момент, действующий на фрезу во время удара, кН·м:

$$M_{уд} = FR = 106,92 \cdot 0,17 = 18,18.$$

9. Согласно формуле (21), относительно постоянный момент, действующий на фрезу в процессе фрезерования равнопрочного монолита (торфа, чернозема, глины и т.д.), кН·м:

$$M_{\phi} = N_{\phi}R/v = 35 \cdot 0,17/9,15 = 0,65.$$

15. По формуле (22) рассчитаем коэффициент, учитывающий увеличение нагрузочного момента при встрече рабочего органа с древесными включениями k :

$$k = M_{уд}/M_{\phi} = 18,18/0,65 = 27,97 \approx 28.$$

Данный пример ярко иллюстрирует, насколько возрастают нагрузки на приводы и рабочие органы машин при фрезеровании (резании, копании, строгании) неоднородной породы вследствие удара.

Определим активную ширину захвата фрезы при косоугольном фрезеровании торфяной залежи на глубину $h = 0,02$ м при угле установки фрезы $\alpha = 30^\circ$. Длина фрезы $L = 1,0$ м; радиус фрезы по концам ножей $R_n = 0,15$ м.

Воспользуемся ранее полученной формулой (33):

$$L_{акт} = \frac{L}{\cos \arctg \frac{2\sqrt{2hR_n - h^2}}{L}} \cos \left(\alpha - \arctg \frac{2\sqrt{2hR_n - h^2}}{L} \right) =$$

$$= \frac{1,0}{\cos \arctg \frac{2\sqrt{2 \cdot 0,02 \cdot 0,15 - 0,02^2}}{1,0}} \cos \left(30^\circ - \arctg \frac{2\sqrt{2 \cdot 0,02 \cdot 0,15 - 0,02^2}}{1,0} \right) = 0,941 \text{ м.}$$

В то же время, если бы активная ширина фрезы была определена по формуле (25), то результат был бы следующим:

$$L_{акт} = L \cos \alpha = 1,0 \cdot \cos 30^\circ = 0,866 \text{ м.}$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Уточнены условия теоретического взаимодействия фрезы с закрепленным древесным включением.

2. Отработаны методики расчета коэффициента увеличения нагрузочного момента на фрезу при столкновении с древесным включением и определения активной ширины захвата фрезы при косоугольном фрезеровании.

3. Получена формула, позволяющая рассчитывать активную ширину захвата фрезы при косоугольном фрезеровании.

ЛИТЕРАТУРА

1. Яблонев А.Л. Теоретическое и экспериментальное обоснование параметров и режимов моделирования работы фрезеров послонно-поверхностного фрезерования торфяной залежи: дис. ... канд. техн. наук. Тверь, 1993. 150 с.
2. Фомин К.В. Методика оценки спектральной плотности момента сопротивления на рабочем органе торфяного фрезерующего агрегата // *Записки горного института*. 2020. Т. 241. С. 58–67.
3. Фомин К.В., Рахутин М.Г. Моделирование повреждающих воздействий на режущих элементах рабочего органа фрезерующего агрегата при взаимодействии с торфом // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-техн. журнал)*. 2019. № S39. С. 36–46.
4. Горлов И.В., Рахутин М.Г. Влияние пнистости залежи на безотказность торфяных машин // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-техн. журнал)*. 2017. № 12. С. 139–145.
5. Баловнев В.И. Оценка инновационных предложений в дорожной и строительной технике. М.: МАДИ, 2008. 100 с.
6. Самсонов Л.Н. Фрезерование торфяной залежи. М.: Недра, 1985. 211 с.
7. Самсонов Л.Н., Синицын В.Ф. Торфяные машины и комплексы: учебник для вузов: в 3 ч. Тверь: ТГТУ, 2001. Ч. 3. 140 с.
8. Яблонев А.Л. Пневматический колесный ход и особенности его взаимодействия с торфяной залежью: монография. Тверь: ТвГТУ, 2011. 168 с.
9. Никитин Е.М. Теоретическая механика для техникумов. М.: Наука, 1988. 336 с.
10. Черногорев Е.П. Теоретическая механика. Элементы теории удара. Челябинск: ЮУрГУ, 2013. 12 с.
11. Акопян А.В., Заславский А.А. Геометрические свойства кривых второго порядка. М.: МЦНМО, 2007. 136 с.

Для цитирования: Яблонев А.Л., Жуков Н.М. Расчет момента сопротивления фрезерованию торфяной залежи при попадании фрезы на пень и определение активной ширины рабочего органа // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2021. № 2 (10). С. 51–61.

CALCULATION OF THE MOMENT OF RESISTANCE TO MILLING A PEAT LAYOUT WHEN THE MILLER HITS A STUMP AND DETERMINATION OF THE ACTIVE WIDTH OF THE WORKING BODY

A.L. YABLONEV, Dr. Sc., N.M. ZHUKOV, postgraduate

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

One of the main operations of the milling method of peat extraction is milling. Drying depends on the quality of the milling, and, accordingly, the entire subsequent production process. The presence of wood inclusions in the peat deposit greatly complicates the work. The sharply increased moment of loading, which occurs when the cutter hits the stump, is able to deactivate both the transmission elements and the drive of the milling unit. Therefore, at the design stage, it is necessary to take into account the dynamic loads arising from the meeting of the cutter with wood inclusions. Attempts to describe a similar fact were previously undertaken by various

*Вестник Тверского государственного технического университета.
Серия «Технические науки». № 2 (10), 2021*

authors, but due to mathematical and methodological errors, they were not crowned with success. In this article, an attempt was made to «work on errors», which allowed, taking into account all the previous errors and inaccuracies, to achieve the desired result.

Keywords: milling, peat, timber content, wood inclusion, cutter, cutter knife, impulse preservation law, moment of resistance to milling, active width of the cutter.

REFERENCES

1. Yablonev A.L. Theoretical and experimental substantiation of the parameters and modes of modeling the operation of milling cutters for layer-by-layer surface milling of peat deposits. Cand. dis. (engineering). Tver, 1993. 150 p. (In Russian).
2. Fomin K.V. Method for assessing the spectral density of the moment of resistance on the working body of a peat milling unit. *Zapiski gornogo institute*. 2020. V. 241, pp. 58–67. (In Russian).
3. Fomin K.V., Rakhutin M.G. Modeling the damaging effects on the cutting elements of the working body of the milling unit when interacting with peat. *Gorniy informatsionno-analitichesky byulleten (nauchno-tekhn. zhurnal)*. 2019. No S39, pp. 36–46. (In Russian).
4. Gorlov I.V., Rakhutin M.G. Influence of stumpiness of deposits on the reliability of peat machines. *Gorniy informatsionno-analitichesky byulleten (nauchno-tekhn. zhurnal)*. 2017. No 12, pp. 139–145. (In Russian).
5. Balovnev V.I. Otsenka innovatsionnykh predlozheniy v dorozhnoy i stroitelnoy tekhnike [Evaluation of innovative proposals in road and construction equipment]. Moscow: MADI, 2008. 100 p.
6. Samsonov L.N. Frezerovaniye torfianoy zalezhi [Milling of peat deposits]. Moscow: Nedra, 1985. 211 p.
7. Samsonov L.N., Sinitsin V.F. Torfyanye mashiny i komplekсы. V 3 ch.: uchebnik dlia vuzov [Peat machines and complexes. Part 3: textbook for universities]. Tver: TGTU, 2001. Ch. 3. 140 p.
8. Yablonev A.L. Pnevmaticheskiy kolesniy hod i osobennosti yego vzaimodeistviya s torfianoy zalezhyu: monografiya [Pneumatic wheel running and peculiarities of its interaction with peat deposits: monograph]. Tver: TvGTU, 2011. 168 p.
9. Nikitin Ye.M. Teoreticheskaya mekhanika dlya tehnikumov [Theoretical mechanics for technical schools]. Moscow: Nauka, 1988. 336 p.
10. Chernogorov Ye.P. Teoreticheskaya mekhanika. Elementi teorii udara [Theoretical mechanics. Elements of impact theory]. Cheliabinsk: YuUrGU, 2013. 12 p.
11. Akopian A.V., Zaslavskiy A.A. Geometricheskiye svoystva krivykh vtorogo poriadka [Geometric properties of curves of the second order]. Moscow: MTsNMO, 2007. 136 p.

Поступила в редакцию/received: 12.01.2021; после рецензирования/revised: 25.03.2021;
принята/accepted: 31.03.2021

ОБОБЩЕННЫЕ ЗАВИСИМОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ КОНВЕЙЕРА ОТ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ЖЕСТКОСТИ ГРУЗОНЕСУЩЕЙ ЛЕНТЫ

В.П. ДЬЯЧЕНКО, канд. техн. наук

Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»,
119049, Москва, Ленинский проспект, д. 4, e-mail: viach.dyachenko@yandex.ru

© Дьяченко В.П., 2021

В статье приведены обобщенные на широкой номенклатуре конвейерных лент аналитические зависимости предельных эксплуатационных параметров конвейера, при которых на участках с малым натяжением ленты происходит потеря формы желоба, цилиндрической жесткости грузонесущей ленты и ее конструктивных и физико-механических свойств. Представлены результаты расчетов по этим зависимостям для ряда современных резинотканевых и резинотросовых лент. Полученные результаты могут быть применены для проверочного расчета минимально допустимого натяжения ленты и максимально допустимого ее прогиба, которые обычно имеют место в зоне загрузки конвейера и являются отправной величиной при построении диаграммы натяжений в процессе тягового расчета конвейера. Полученные зависимости особенно необходимы для определения параметров переходных участков ленточных конвейеров.

Ключевые слова: ленточный конвейер, эксплуатационные параметры, переходные участки, конвейерные ленты, минимальное натяжение, прогиб, физико-механические характеристики.

DOI: 10.46573/2658-5030-2021-62-69

ВВЕДЕНИЕ

Методика тягового расчета ленточных конвейеров включает в себя проверку прогиба ленты в зоне минимального натяжения (обычно в зоне загрузки конвейера). Из этого условия зачастую выбирают всю диаграмму натяжения ленты на конвейере.

Действовавшие до настоящего времени нормы расчета минимального натяжения ленты как абсолютно гибкой нити, нагруженной распределенной нагрузкой q , включающей вес груза и самой ленты, были разработаны для лент с бельтинговым сердечником шириной 0,6...0,8 м. Норма максимального прогиба ленты установлена в размере 3...5 см для обычного пролета между роlikоопорами 1,0...1,2 м. В настоящее время принята формула для проверки минимального натяжения ленты при шаге роlikоопор l'_p :

$$S_{min} \geq (5 \dots 8) ql'_p.$$

Как указано в работе [1], для современных конвейерных лент минимально допустимое натяжение ленты должно проверяться по критическому моменту продольного изгиба желобчатой ленты, обладающей цилиндрической жесткостью, в сопоставлении с ее натяжением, нагрузкой на пролет между роlikоопорами и шагом роlikоопор, что является предметом настоящего исследования.

С целью решения вопроса о рациональном соотношении ширины ленты, расстояния между поддерживающими роlikоопорами и минимального натяжения ленты с точки зрения устойчивости формы желоба в работе [1] нами рассмотрено

деформированное состояние желобчатой конвейерной ленты между роlikоопорами от действующих нагрузок, но без учета натяжения. Установлено, что зависимость внешнего момента от продольной кривизны имеет максимум, соответствующий критическому изгибающему моменту $M_{кр}$. В докритической области изгиба форма поперечного сечения ленты остается желобчатой. В закритической области этой кривой происходит потеря устойчивости желоба ленты с внезапным распрямлением поперечного сечения в середине пролета между роlikоопорами. Получены уравнения кривых состояния ленты при продольном изгибе. В последующем нами рассчитаны значения критического момента и критической кривизны при продольном изгибе для широкого ассортимента отечественных и зарубежных резинотканевых и резиновых лент.

Величины критических изгибающих моментов и критической кривизны желобчатых лент в продольном направлении используются ниже для определения предельно допустимых значений параметров конвейера по условию отсутствия развала ленты на линейной части и переходных участках.

Параметры ленточных конвейеров и конвейерных лент выбираются их проектировщиками в комплексе. Натяжение ленты, погонная нагрузка на конвейере, ширина ленты, ее разрывная прочность (а значит, и модуль упругости), толщина ленты связаны между собой и с производительностью и длиной конвейера как простыми непосредственными зависимостями, так и сложными опосредованными связями, образующимися в результате сложных расчетов проектировщиков. Вследствие этого формируются типоразмерные ряды конвейеров, в которых можно проследить некоторые среднестатистические взаимосвязи между параметрами, не вытекающие непосредственно из законов механики. Эти связи сокращают число независимых варьируемых параметров. Производители конвейерных лент выпускают типоразмерные ряды (линейки) лент, в которых также имеются среднестатистические взаимосвязи между параметрами, позволяющие сократить номенклатуру лент. Поэтому и для получения обобщающих выводов о выборе параметров конвейера по условию отсутствия развала ленты необходимо учитывать данные среднестатистические закономерности, обобщенные на достаточно представительных типоразмерных рядах и на опыте проектирования. Ниже нами предпринята такая попытка.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Средний радиус кривизны поперечного сечения ленты (приблизительно считая сечение сегментом окружности) обозначим через r (рисунок). При установке боковых роликков под углом $\alpha = 30^\circ$ он рассчитывается по формуле

$$r = \frac{3B}{\pi}, \quad (1)$$

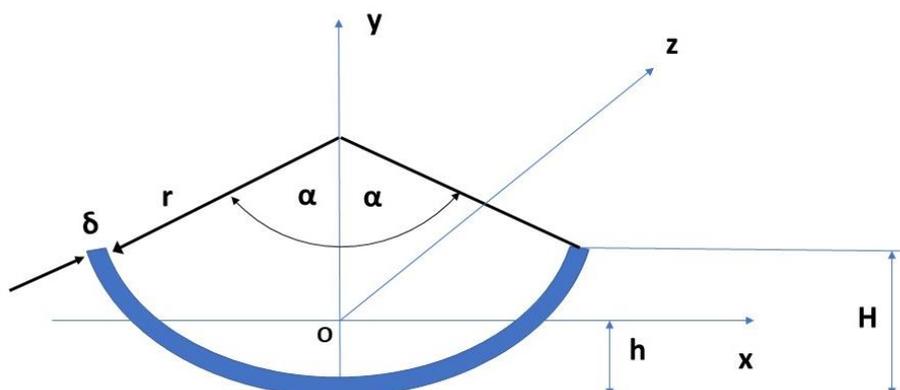
где B – ширина ленты.

Обозначим радиус кривизны продольного сечения срединной линии ленты (сечения вдоль оси z на рисунке) в точке максимального прогиба через ρ , тогда относительная кривизна ленты

$$K = \frac{r}{\rho}.$$

Для определения предельно допустимых значений параметров конвейера используем упрощенную модель изгиба ленты в пролете между роlikоопорами в продольном направлении в виде балки, опертой определенным образом на концах. При

этом будем развивать некоторые положения работы [2], имея в виду, однако, что в указанной работе имеется ряд неточностей.



Параметры поперечного сечения желобчатой ленты и принятая система координат

При решении задачи деформирования ленты в докритической области при сложном нагружении ее можно рассматривать как некоторый эквивалентный стержневой элемент, растянутый продольной силой, равной натяжению ленты. Для этого необходимо определить изгибную жесткость эквивалентного стержня, которую можно получить, используя известное соотношение теории изгиба:

$$\frac{1}{\rho} = \frac{M}{EJ}, \quad (2)$$

отсюда изгибная жесткость эквивалентного стержня

$$E_{\text{э}}J_{\text{э}} = \frac{M_{\text{кр}}r}{K_{\text{кр}}}. \quad (3)$$

Считая стержень линейно деформируемым в этой области и принимая из кривых напряженно-деформированного состояния ленты соответствующие друг другу значения $M_{\text{кр}}$ и $K_{\text{кр}}$ (при известном r), с помощью соотношения (3) легко получить значение жесткости эквивалентного стержня. Использование значения эквивалентной жесткости значительно упрощает различного рода расчеты конструкций, содержащих желобчатую ленту.

Определим наибольшую допустимую величину расстояния между роlikо-опорами, исходя из условия устойчивости желобчатой формы ленты.

Будем рассматривать ленту как стержень с жесткостью, эквивалентной изгибной жесткости желобчатой ленты $E_{\text{э}}J_{\text{э}}$. Расчетная схема при работе ее на конвейере будет представлять собой многопролетную неразрезную балку. Для определения изгиба ленты от действия продольно-поперечной нагрузки достаточно найти ее изгиб в пределах одного пролета, заменив указанную расчетную схему схемой однопролетной балки с заделанными концами. В приемлемости такого вида расчетной схемы для нашего случая можно убедиться, произведя расчеты неразрезной балки с бесконечно увеличивающимся количеством пролетов равной длины.

При этом опорные моменты в середине пролетов будут стремиться к величине $\frac{ql^2}{24}$, которая соответствует значению момента в однопролетной балке с заделанными концами [3].

Соотношение изгибающих моментов в середине балки при продольно-поперечном изгибе M_{Π} и поперечном M определяется следующим известным выражением:

$$M_{\Pi} = \frac{M}{1 + \frac{S}{P_3}} \left(P_3 = \frac{\pi^2 EJ}{(al)^2} \right), \quad (4)$$

где S – продольное растягивающее усилие; EJ – изгибная жесткость балки; l – длина балки; a – коэффициент, зависящий от условий на концах балки (при двухсторонней жесткой заделке $a = 1/2$ [3]).

Подставив вместо M его значение в середине пролета для ленты согласно принятой расчетной схеме $M = \frac{ql^2}{24}$, а вместо $M_{кр}$ – значение изгибающего критического момента для желоба ленты $M_{кр}$ и заменив S на S_{min} , EJ – на $E_3 J_3$, после соответствующих преобразований получим выражение для определения наибольшего допустимого расстояния между роlikоопорами по условию устойчивости желобчатой формы ленты:

$$l = \sqrt{\frac{24M_{кр}}{q - \frac{24a^2 M_{кр} S_{min}}{\pi^2 E_3 J_3}}}. \quad (5)$$

При определении шага роlikоопор по формуле (5) в качестве изгибающей поперечной нагрузки q желательно принимать ее значение с учетом коэффициента динамичности поперечного перемещения ленты с грузом, соответствующего данной скорости транспортирования. Инерционность подвижной нагрузки можно учесть, используя следующую формулу для динамического давления груза:

$$q_d = q \left(1 + \frac{v^2}{g\rho} \right), \quad (6)$$

где q – вес подвижной нагрузки; v – скорость перемещения; g – ускорение свободного падения.

Впрочем, поправка составляет десятые доли процента и ею можно пренебречь.

В дальнейшем удобнее использовать удельную величину критического момента $\mu_{кр} = M_{кр}/D_z$ (D_z – цилиндрическая жесткость ленты в продольном направлении), которая может быть принята в качестве обобщенного параметра, имеющего достаточно статистически устойчивые значения для большинства линеек выпускаемых конвейерных лент. Тогда, учитывая формулы (1) и (3), выражение (5) можно записать в виде

$$l = \sqrt{\frac{24 \mu_{кр} D_z}{q - \frac{2S_{min} K_{кр}}{\pi B}}}. \quad (7)$$

У тканевых лент основное сопротивление изгибу оказывает каркас ленты, толщина которого равна суммарной толщине прокладок и сквиджей. В этом случае

цилиндрическая жесткость, Н · м, резиноканевой ленты в продольном направлении рассчитывается как

$$D_z = \frac{E_z \delta_k^3}{12(1-\nu_x \nu_z)}, \quad (8)$$

где E_z – продольный модуль упругости ленты; δ_k – толщина каркаса ленты, т. е. суммарная толщина прокладок и сквиджей (без учета обкладок); ν_x, ν_z – коэффициенты Пуассона, соответствующие продольному и поперечному направлениям.

Заметим, что коэффициенты Пуассона в поперечном и продольном направлениях будут различными, обратно пропорциональными модулям упругости в силу закона парности касательных напряжений.

Иногда резиноканевую ленту в продольном направлении рассматривают как пластинку, армированную равноотстоящими элементами жесткости. При таком допущении цилиндрическая жесткость резиноканевой ленты в продольном направлении определяется по формуле [3]:

$$D_z = D_x + \frac{3}{8} \frac{E_0 I}{t}, \quad (9)$$

где E_0 – модуль упругости проволок; $I = 3,33 \cdot 10^{-2} \cdot d_{mp}^4$ – момент инерции сечения троса; d_{mp} – диаметр троса; t – шаг тросов; $D_x = \frac{E_p \delta^3}{12(1-\nu_x \nu_z)}$ – цилиндрическая жесткость резиноканевой ленты в поперечном направлении; E_p – модуль упругости резины; δ – толщина ленты.

Анализ полученных нами в работе [1] формул показывает, что удельная величина критического момента $\mu = M_{кр} / D_z$ и критическая кривизна $K_{кр}$ зависят лишь от соотношений $b = \frac{B}{\delta_k}$, $c = \frac{D_x}{D_z} = \frac{E_x}{E_z}$, а также от значения коэффициентов Пуассона ν_x, ν_z . Величина b имеет высокую статистическую устойчивость на отдельных линейках лент, что связано с увеличением ширины выпускаемых лент по мере повышения их удельной разрывной прочности. Величина c фактически принимает только три значения, соответствующие трем различным конструкциям лент: 0,22; 0,60 и 1,0. Значение коэффициента Пуассона ν_x обычно принимают равным 0,275, а ν_z связан с ним через коэффициент c . Таким образом, указанные величины претендуют на роль обобщенных параметров. При этом величина $M_{кр} = \mu D_z$ зависит от E_z , но на основе данных, приведенных в работе [5] для резиноканевых лент ведущих отечественных и зарубежных производителей, нами установлена достаточно точная среднестатистическая линейная зависимость:

$$E_z \approx 75 \frac{k_p}{\delta_k},$$

где k_p – разрывная прочность ленты, Н/м ширины.

При этом, как правило, производители выпускают линейки лент, в которых $B = 10^{-6} \cdot k_p$ или (чаще) $B = 1,25 \cdot k_p \cdot 10^{-6}$ (формулы эмпирические, поэтому размерности в них не соблюдаются).

Некоторые обобщенные закономерности можно позаимствовать из методики выбора и расчета параметров ленточных конвейеров [4]. Например, усредняя некоторые коэффициенты в формулах этой методики, можно получить упрощенные

выражения для натяжений ленты при сбегаии с хвостового барабана и при набегании на приводной барабан:

$$S_{min} \approx (0,4 \dots 1,3)q_r Lw'; \quad S_{max} \approx (1,5 \dots 15)q_r Lw'; \quad (10)$$

$$q_e \approx 1\,100 B^2; \quad q \approx 1\,400 B^2, \quad (11)$$

где q_e, q – погонные нагрузки от веса груза и груза с лентой, Н/м; L – длина конвейера, м; w' – общий коэффициент сопротивления движению, обычно принимаемый равным 0,035).

Меньшие числа в скобках соответствуют углу наклона конвейера $\beta = 0^\circ$, а большие – $\beta = 18^\circ$, величина тягового фактора принята равной 6,0. Приведенные зависимости позволяют выразить формулу (7) через различные сочетания параметров конвейера, а не только через нагрузку и натяжение ленты. Кроме того, подстановка усредненных соотношений (10) и (11) в выражение (7) показывает, что даже на мощных конвейерах большой длины влияние натяжения S_{min} ничтожно мало. Определяющей является цилиндрическая жесткость ленты, и шаг роликоопор нужно находить из ее величины.

Из соотношений (10) и (11) можно показать, что проверка по формуле минимального натяжения ленты, приведенной во введении, теряет смысл на горизонтальных конвейерах начиная с длины конвейера 500 м при тяговом факторе $A = 6,0$; с длины 200 м – при $A = 2,6$ и на конвейерах с углом наклона 18° начиная с длины 30 м при $A = 2,6$.

Рассмотрим переходные участки конвейера. Для более равномерного натяжения по ширине ленты на переходном участке между приводным или разгрузочным барабаном и ближайшей роликоопорой рекомендуется подъем верхней образующей барабана над верхней образующей среднего ролика на величину $h = H/3$ (см. рисунок) [5]. На самом деле величина h должна быть равна расстоянию до главной оси инерции поперечного сечения ленты x , следовательно, согласно [3]:

$$\frac{h}{H} = \frac{\alpha - \sin\alpha}{\alpha(1 - \cos\alpha)}.$$

Можно убедиться, что при $\alpha = 25 \dots 45^\circ$ это отношение с очень высокой точностью равно $1/3$ (если считать желоб ленты сегментом окружности).

Кроме того, устанавливается минимально допустимая длина переходного участка $l_{пер}$. Так, фирма Metso Minerals для своих лент Trellex рекомендует значение $l_{пер} = 0,9 \cdot B$ [5]. Однако, исходя из приведенных выше рассуждений, необходимо определять и максимально допустимую по устойчивости желоба ленты длину переходного участка.

Минимально допустимую длину установим из условия достаточности изгибающего момента в эквивалентной балке на ее конце (при набегании на барабан) для выполаживания желоба ленты до плоского состояния при продольном изгибе выпуклостью вверх. Момент на жестко заделанных концах балки [3]

$$M = \frac{ql^2}{12}.$$

Таким образом, нужно только заменить в формуле (7) число 24 на 12 и учесть, что при таком изгибе величина $\mu_{кр}$ больше, чем при изгибе выпуклостью вниз на $8 \dots 12\%$.

Максимально допустимую длину определим по значению допустимого изгибающего момента в эквивалентной балке в ее средней части при продольном изгибе выпуклостью вниз, считая, что на одном конце она заделана жестко, а на другом – шарнирно (изгибающим моментом плоской ленты при набегании на барабан можно пренебречь). При этом момент в середине балки [3]

$$M = \frac{ql^2}{128}.$$

Следовательно, нужно только заменить в формуле (7) число 24 на 128 и учесть, что при такой заделке концов коэффициент $a = 0,7$ [3].

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ, ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

Для примера нами были выполнены расчеты по предложенным обобщенным формулам для ленты ТК-400 с восьмью прокладками шириной 1,6 м. Тяговое усилие конвейера и натяжения ленты приняты из условия полного использования ее прочности при коэффициенте запаса 10.

Получены значения: $l'_p = 1,76$ м, $l_{пер\ min} = 1,26$ м, $l_{пер\ max} = 4,0$ м. Очевидно, что чем больше длина переходного участка, тем лучше. Однако она ограничена по условию устойчивости желоба ленты в середине этого участка. При этом влияние натяжения ленты оказалось ничтожно малым.

Таким образом, при проектировании ленточного конвейера рекомендуются следующие действия:

- 1) максимально допустимый шаг роlikоопор проверять из условия устойчивости желоба ленты по приведенным выше зависимостям;
- 2) для более равномерного натяжения по ширине ленты на переходном участке между приводным или разгрузочным барабаном и ближайшей роlikоопорой подъем верхней образующей барабана над верхней образующей среднего ролика устанавливать на величину превышения главной оси инерции поперечного сечения ленты над ее нижней точкой; это превышение зависит только от ширины ленты и угла наклона боковых роlikов;
- 3) кроме минимально допустимой длины переходного участка, определять максимально допустимую по устойчивости желоба ленты длину этого участка;
- 4) минимально допустимую длину переходного участка находить с учетом цилиндрической жесткости ленты.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дьяченко В.П. Особенности деформации желобчатой конвейерной ленты при малых натяжениях // *Вестник Тверского государственного университета. Серия «Технические науки»*. 2020. № 4 (8). С. 46–53.
2. Шибалов С.Ф. Исследование ленточно-канатного конвейера для крупнокусковых скальных грузов: дис. ... канд. техн. наук. М., 1978. 251 с.
3. Писаренко Г.С., Яковлев А.П., Матвеев В.В. Справочник по сопротивлению материалов. Киев: Наукова думка, 1988. 736 с.

4. Галкин В.И., Дмитриев В.Г., Дьяченко В.П., Запенин И.В., Шешко Е.Е. Современная теория ленточных конвейеров горных предприятий. М.: Горная книга, 2011. 545 с.

5. Галкин В.И., Шешко Е.Е., Сазанкова Е.С. Современные конвейерные ленты: учеб. пособие. М.: МИСиС, 2014. 104 с.

Для цитирования: Дьяченко В.П. Обобщенные зависимости эксплуатационных параметров конвейера от цилиндрической жесткости грузонесущей ленты // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2021. № 2 (10). С. 62–69.

GENERALIZED DEPENDENCES OF THE OPERATIONAL PARAMETERS OF THE CONVEYOR ON THE CYLINDRICAL STIFFNESS OF THE LOAD-BEARING BELT

V.P. DYACHENKO, Cand. Sc.

National research technological university «MISIS», 4, Leninsky Prospekt, 119049, Moscow, Russian Federation, e-mail: viach.dyachenko@yandex.ru

The article presents generalized to a wide range of conveyor belts analytical dependences limit operating parameters of the pipeline, which in areas with low tension loss occurs from the gutter, from the cylindrical stiffness of the load-carrying belt and its structural and physical-mechanical properties. The results of calculations on these dependences for a range of modern rubber-fabric and rubber-wire belts are presented. The obtained results can be used for the verification calculation of the minimum allowable belt tension and the maximum allowable belt deflection, which usually occur in the loading zone of the conveyor and are the starting value when constructing a tension diagram during the traction calculation of the conveyor. The obtained dependencies are especially necessary for determining the parameters of the transition sections of belt conveyors.

Keywords: belt conveyor, operational parameters, transition sections, conveyor belts, minimum tension, deflection, physical and mechanical characteristics.

REFERENCES

1. Dyachenko V.P. Features of deformation of the grooved conveyor belt at low tensions. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya «Tekhnicheskie nauki»* 2020. No 4 (8), pp. 46–53. (In Russian).

2. Shibalov S.F. Research of the belt-rope conveyor for large-bulk rock cargo. Cand. dis. (technical). Moscow, 1978. 251 p. (In Russian).

3. Pisarenko G.S., Yakovlev A.P., Matveev V.V. *Spravochnik po soprotivleniju materialov* [Handbook of material resistance]. Kiev: Naukova Dumka, 1988. 736 p.

4. Galkin V.I., Dmitriev V.G., Dyachenko V.P., Zapenin I.V., Sheshko E.E. *Sovremennaya teoriya lentochnykh konveyerov gornyx predpriyatij* [Modern theory of the belt conveyors of mining enterprises]. Moscow: Gornaya kniga, 2011. 545 p.

5. Galkin V.I., Sheshko E.E., Sazankova E.S. *Sovremennyye konvejernyye lenty* [Modern conveyor belts]. Moscow: MISiS, 2014. 104 p.

Поступила в редакцию/received: 10.03.2021; после рецензирования/revise: 25.03.2021; принята/accepted: 31.03.2021

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 681.545

АВТОМАТИЧЕСКИЙ ТРАНСФУЗИОННЫЙ АНАЛИЗАТОР КОНЦЕНТРАЦИИ ВОДОРОДА В МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ГАЗОВЫХ СРЕДАХ

Л.В. ИЛЯСОВ, д-р техн. наук

Тверской государственный технический университет,
170026, Тверь, наб. Аф. Никитина, д. 22, e-mail: lvi450714@mail.ru

© Илясов Л.В., 2021

Приводятся результаты разработки автоматического трансфузионного анализатора концентрации водорода в многокомпонентных газовых средах. Излагается сущность работы анализатора, в котором впервые использован метод трансфузионного дифференциального измерения объемной концентрации водорода в водородсодержащих газах путем нахождения суммарной объемной концентрации неопределяемых компонентов. Описывается схема автоматического анализатора, реализованного на базе промышленного потокового хроматографа. Схема включает в себя измерительную и сравнительную трансфузионные ячейки, снабженные фторопластовыми мембранами, которые обладают селективной проницаемостью для молекул водорода, и термокондуктометрический детектор, входящий в состав названного хроматографа. Приводятся зависимости, описывающие сигнал анализатора, и технические характеристики реализованного макета анализатора. Обосновывается целесообразность использования импульсного метода ввода пробы анализируемого газа и циклического режима работы анализатора. Делается вывод о том, что дифференциальное трансфузионное измерение суммарной объемной концентрации неопределяемых компонентов при использовании термокондуктометрического детектора обеспечивает низкое значение погрешности измерения концентрации водорода.

Ключевые слова: автоматический трансфузионный анализатор, водород, объемная концентрация, дифференциальный метод измерений, неопределяемые компоненты.

DOI: 10.46573/2658-5030-2021-70-76

ВВЕДЕНИЕ

Одним из основных направлений совершенствования производства нефтепродуктов в настоящее время является применение процессов гидрогенизации, в которых используются потоки водородсодержащих газов с концентрацией водорода 80...95 %. Для измерений концентрации водорода в этих потоках в основном используют хроматографические анализаторы. Время хроматографического анализа водородсодержащих газов составляет 15...20 мин [1], что затрудняет применение полученной измерительной информации для управления технологическими процессами, использующими водородсодержащие газы. Наиболее удобны для управления названными процессами трансфузионные автоматические анализаторы [2–4], обеспе-

*Вестник Тверского государственного технического университета.
Серия «Технические науки». № 2 (10), 2021*

чивающие селективное измерение концентрации водорода в многокомпонентных газовых средах за 2...3 мин. Их недостатком является то, что они имеют относительно высокую погрешность измерений ($\pm 2...3\%$), так как их работа основана на использовании прямого трансфузионного метода измерений концентрации водорода в многокомпонентных газовых средах.

В статье описывается автоматический трансфузионный анализатор концентрации водорода в водородсодержащих газовых средах, в котором используется трансфузионный дифференциальный метод измерений [5], обеспечивающий измерение концентрации водорода с погрешностью, в 3...10 раз меньшей, чем у известных трансфузионных и хроматографических анализаторов. С его помощью измеряется суммарная объемная концентрация неопределяемых компонентов в этих газах, что может быть выполнено трансфузионным термокондуктометрическим детектором [6, 7].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Схема, поясняющая принцип действия трансфузионного дифференциального анализатора концентрации водорода, показана на рис. 1.

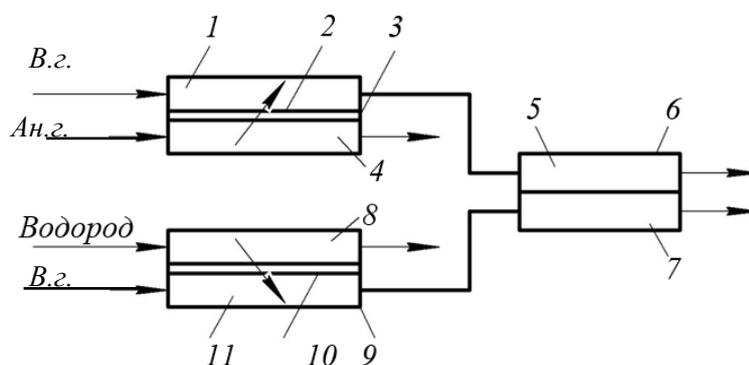


Рис. 1. К пояснению принципа действия дифференциального трансфузионного анализатора концентрации водорода: 1 и 11 – проточные камеры вспомогательного газа; 2 и 10 – фторопластовые мембраны; 3 и 9 – измерительная и сравнительная трансфузионные ячейки; 4 – проточная камера анализируемого газа; 5 и 7 – измерительная и сравнительная камеры термокондуктометрического детектора; 6 – термокондуктометрический детектор; 8 – проточная камера водорода

В работе устройства используется явление трансфузии, заключающееся в проникновении молекул газа через мембрану, которая обладает селективной проницаемостью для молекул некоторых газов, например водорода или гелия. Такие мембраны представляют собой тонкие пластины из фторопласта или сплава серебра с палладием. Анализатор содержит две идентичные по характеристикам трансфузионные ячейки: измерительную и сравнительную. Через камеры измерительной ячейки непрерывно с постоянным объемным расходом прокачиваются потоки вспомогательного газа *В.г.* и анализируемого водородсодержащего газа *Ан.г.*, а через камеры сравнительной трансфузионной ячейки с постоянными объемными расходами прокачиваются потоки вспомогательного газа (азота или воздуха) и водорода. Молекулы водорода из камер анализируемого газа и водорода через селективно проницаемые мембраны проникают в соответствующие камеры вспомогательного газа, а затем транспортируются соответственно в измерительную и сравнительную камеры термокондуктометрического детектора. В камерах трансфузионных ячеек к потокам вспомогательного газа примешиваются молекулы водорода, проникшие через

мембраны. Причем в потоке вспомогательного газа в сравнительной трансфузионной ячейке к потоку этого газа постоянно примешивается одно и то же количество водорода, поэтому сигнал сравнительной ячейки термокондуктометрического детектора будет всегда постоянен. Количество водорода, проникающего через мембрану измерительной трансфузионной ячейки, будет изменяться в зависимости от концентрации примесей в потоке водородсодержащего анализируемого газа, в связи с чем в потоке вспомогательного газа в измерительной трансфузионной ячейке будет изменяться концентрация водорода, что вызовет изменение сигнала измерительной ячейки термокондуктометрического детектора и, как следствие, сигнала самого детектора, которое может быть описано следующим образом: в соответствии с математическим описанием трансфузионного газоанализатора [3] для сигналов сравнительного U_1 и измерительного U_2 каналов анализатора водорода можно записать:

$$U_1 = K_\lambda \cdot \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_B} \right) \cdot \frac{D_M \cdot S_1}{\delta_1 \cdot Q_{B1}} \cdot C_1; \quad (1)$$

$$U_2 = K_\lambda \cdot \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_B} \right) \cdot \frac{D_M \cdot S_2}{\delta_2 \cdot Q_{B2}} \cdot C_2, \quad (2)$$

где K_λ – коэффициент преобразования термокондуктометрического детектора; λ и λ_B – теплопроводность водорода и вспомогательного газа соответственно; D_M – коэффициент проницаемости водорода через мембраны; S_1 и S_2 – площади мембран; δ_1 и δ_2 – толщины мембран; C_1 и C_2 – объемные концентрации водорода в потоках газов, протекающих соответственно через сравнительную и измерительную трансфузионные ячейки.

Если сравнительная и измерительная трансфузионные ячейки изготовлены идентичными, то есть справедливо: $S_1 = S_2 = S$; $\delta_1 = \delta_2 = \delta$ и объемные расходы вспомогательного газа равны $Q_{B1} = Q_{B2} = Q_B$, то выражения (1) и (2) можно преобразовать к виду:

$$U_1 = K \cdot C_1; \quad (3)$$

$$U_2 = K \cdot C_2, \quad (4)$$

где $K = K_\lambda \cdot \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_B} \right) \cdot \frac{D_M \cdot S}{\delta \cdot Q_B}$ – коэффициент преобразования по концентрации сравнительного и измерительного каналов газоанализатора.

Поскольку через камеру водорода сравнительной трансфузионной ячейки всегда протекает чистый водород, то $C_1 = 1$. Концентрация водорода в камере измерительного канала может быть описана выражением

$$C_2 = 1 - C_\Pi, \quad (5)$$

где C_Π – суммарная объемная концентрация неопределяемых компонентов в потоке анализируемого водородсодержащего газа.

Выражение (5) справедливо только в том случае, если мембраны трансфузионных ячеек обладают селективной проницаемостью для молекул водорода. При соблюдении названных условий сигнал термокондуктометрического детектора, являющийся сигналом всего газоанализатора, с учетом выражений (3), (4) описывается формулой

$$\Delta U = U_1 - U_2 = K \cdot C_\Pi. \quad (6)$$

Таким образом, рассмотренный газоанализатор способен измерять суммарную концентрацию примесей в водородсодержащем газе с относительной погрешностью $\pm 2 \dots 3 \%$, которой обладает термокондуктометрический детектор, поэтому концентрация водорода в водородсодержащем газе, определяемая выражением (5), будет измеряться с погрешностью, существенно меньшей по сравнению с той, с которой она может быть измерена трансфузионным анализатором, обуславливающим полное значение объемной концентрации водорода [2, 4]. Причем, чем меньше значение $C_{\text{п}}$, тем с меньшей погрешностью может быть измерена концентрация водорода трансфузионным дифференциальным газоанализатором.

Автоматический трансфузионный анализатор конструктивно был реализован на базе потокового промышленного хроматографа типа «Интерхром». В устройстве используется импульсный ввод пробы анализируемого газа [8], который позволяет периодически корректировать начальный уровень сигнала в процессе анализа и подводить пробу в детектор постоянной объемной скорости, не зависящей от состава анализируемого газа, благодаря чему точность измерений повышается.

Схема автоматического анализатора концентрации водорода показана на рис. 2.

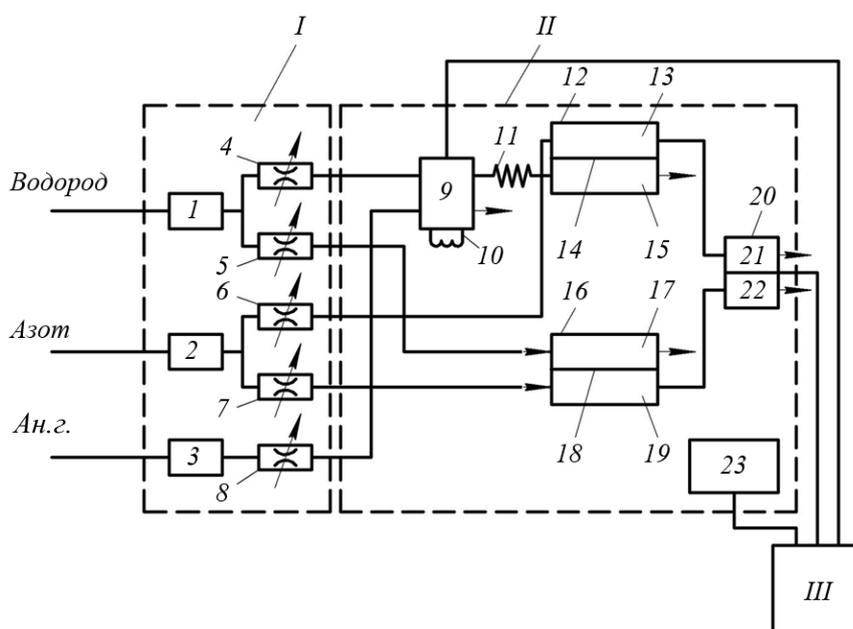


Рис. 2. Схема автоматического трансфузионного анализатора концентрации водорода в многокомпонентных газовых средах: 1 и 2 – стабилизаторы давления и расхода газов; 3 – стабилизатор давления анализируемого газа; 4–8 – переменные дроссели; 9 – автоматический дозатор газовых проб; 10 – дозируемый объем анализируемого газа; 11 – колонка; 12 и 16 – измерительная и сравнительная трансфузионные ячейки; 13 и 19 – проточные камеры вспомогательного газа; 14 и 18 – фторопластовые мембраны; 15 – проточная камера анализируемого газа; 17 – проточная камера водорода; 20 – термокондуктометрический детектор; 21 и 22 – измерительная и сравнительная камеры детектора; 23 – тепловыделяющий элемент

В блоке подготовки газов I расположены стабилизаторы давления и расхода водорода и вспомогательного газа, а также стабилизатор давления анализируемого газа. В этом блоке также размещены переменные дроссели, служащие для настройки значений расхода водорода, азота и анализируемого газа. В аналитическом блоке II

расположен автоматический дозатор газовых проб с постоянным дозируемым объемом, колонка, представляющая собой трубку из нержавеющей стали с внутренним диаметром 4 мм и длиной 1 м, измерительная и сравнительная трансфузионные ячейки, термокондуктометрический детектор, содержащий измерительную и сравнительную камеры, в которых расположены терморезисторы, и тепловыделяющий элемент, используемый в системе автоматического регулирования температуры во внутренней полости аналитического блока. Блок обработки, отображения информации и управления III представляет собой промышленный компьютер, который выполняет следующие функции: контролирует условия проведения анализа, управляет клапанами, служащими для переключения дозатора, регулирует температуру в аналитическом блоке, обрабатывает импульсный сигнал детектора, хранит результаты проведенных анализов и ведет отчетную документацию о результатах анализа.

Автоматический анализатор концентрации водорода имеет два режима работы: подготовки и анализа. В процессе работы в аналитическом блоке поддерживается температура, равная 50 °С, и из блока подготовки газов непрерывно поступают с постоянными объемными расходами водород и азот, а также при постоянном давлении анализируемый газ. В режиме «Подготовка» (длится 15...20 с) в сравнительные камеры трансфузионных ячеек с постоянным объемным расходом подаются потоки азота с расходом, равным 2 л/ч, которые из этих камер поступают в соответствующие камеры термокондуктометрического детектора. Один из потоков водорода с постоянным объемным расходом 2 л/ч через автоматический дозатор поступает в колонку, а затем – в проточную камеру анализируемого газа измерительной трансфузионной ячейки. Второй поток водорода с постоянным объемным расходом 2 л/ч поступает в проточную камеру водорода сравнительной трансфузионной ячейки. Анализируемый газ при стабильном давлении через дроссель поступает в дозатор, каналы которого соединены таким образом, что анализируемый газ промывает дозируемый объем. Поскольку через соответствующие проточные камеры трансфузионных ячеек в этом режиме протекает чистый водород, его молекулы проникают через фторопластовые мембраны и примешиваются к потокам азота, а образовавшиеся смеси газов поступают в измерительную и сравнительную камеры термокондуктометрического детектора. Возникающий при этом сигнал детектора принимается за начальный уровень.

В режиме «Анализ» по команде компьютера каналы автоматического дозатора переключаются так, что через дозируемый объем начинают протекать поток водорода, который выталкивает отобранный объем (пробу) анализируемого газа из дозатора и через колонку транспортирует ее в измерительную трансфузионную ячейку. Когда проба анализируемого газа протекает через измерительную камеру трансфузионной ячейки, количество водорода, проникающего из нее через мембрану в поток азота, уменьшается и объемная концентрация водорода снижается по сравнению с той, какой она была ранее, при протекании потока чистого водорода. Концентрация водорода в потоке азота, протекающего через измерительную камеру трансфузионной ячейки, сокращается. Поэтому в измерительную камеру детектора поступает азот с меньшей концентрацией водорода, в то время как в сравнительную ячейку детектора поступает азот с постоянной концентрацией водорода. При таких условиях терморезистор измерительной камеры детектора будет нагреваться, так как теплопроводность азота меньше, чем теплопроводность водорода, а температура терморезистора сравнительной камеры детектора будет оставаться постоянной. В результате формируется сигнал детектора, который при протекании пробы анализируемого водородсодержащего газа имеет вид импульса, близкого по форме к кривой Гаусса, площадь под которой зависит от объемной суммарной концентрации неопределяемых компонентов (примесей) в водородсодержащем газе. При этом объемная концентрация водорода определяется из

выражения (6). Наличие колонки в составе аналитического блока обеспечивает создание небольшого (10...20 с) интервала времени между отбором пробы и ее поступлением в измерительную трансфузионную ячейку, что необходимо для исключения наложения флуктуаций начального уровня сигнала, появляющихся при переключении каналов дозатора, на полезный сигнал детектора. В последующих циклах работы анализатора все описанные выше операции повторяются.

В реализованном макете анализатора использовались трансфузионные ячейки с площадью фторопластовых мембран, равной 170 мм², толщиной 25 мкм и с объемами проточных камер 0,25 см³. В процессе работы применялись следующие значения режимных параметров: объемный расход водорода 4 л/ч; объемный расход азота 4 л/ч; объем пробы анализируемого газа 1,5...5,0 мл (в зависимости от суммарной концентрации неопределяемых компонентов); температура аналитического блока 50 °С; расход анализируемого газа 15...20 л/ч; длительность одного цикла анализа 2...3 мин.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанный автоматический анализатор объемной концентрации водорода, реализованный на базе измерительной и сравнительной трансфузионных ячеек с фторопластовыми мембранами, с использованием дифференциального метода измерений и импульсного ввода пробы анализируемого газа позволяет измерять суммарную объемную концентрацию неопределяемых компонентов в водород-содержащем газе с погрешностью, в 5...10 раз меньшей, чем существующие аналоги.

ЛИТЕРАТУРА

1. Липавский В.Н., Березкин В.Г. Автоматические газовые потоковые хроматографы. М.: Химия, 1982. 264 с.
2. Тхоржевский В.Н. Автоматический анализ газов и жидкостей на химических предприятиях. М.: Химия, 1976. 272 с.
3. Фарзане Н.Г., Илясов Л.В., Азим-заде А.Ю. Технологические измерения и приборы. М.: Высшая школа, 1989. 456 с.
4. Ваня Я. Анализаторы газов и жидкостей / пер. с чеш. О.С. Арутюнова М.: Энергия, 1970. 552 с.
5. Патент РФ 56633 *Анализатор концентрации водорода в газовых средах* / Илясов Л.В., Давыденков А.К. Заявл. 05.05.2005. Оpubл. 10.09.2006, Бюл. № 25.
6. Бражников В.В. Детекторы для хроматографии. М.: Машиностроение, 1992. 320 с.
7. Руководство по газовой хроматографии: в 2 т. / под ред. Э. Лейбница, Х.Г. Штруппе. М.: Мир, 1981. Т. 1. 480 с.
8. Фарзане Н.Г., Илясов Л.В. Импульсный ввод анализируемого газа в автоматических газоанализаторах // *Измерительная техника*. 1971. № 4. С. 34–38.

Для цитирования: Илясов Л.В. Автоматический трансфузионный анализатор концентрации водорода в многокомпонентных газовых средах // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2021. № 2 (10). С. 70–76.

AUTOMATIC TRANSFUSION ANALYZER OF HYDROGEN CONCENTRATION IN MULTICOMPONENT GAS MEDIAS

L.V. ILYASOV, Dr. Sc.

Tver State Technical University, 22, Af. Nikitin emb.,
170026, Tver, Russian Federation, e-mail: lvi450714@mail.ru

The results of automatic transfusion hydrogen concentration analyzer development of in multicomponent gas media are presented. The essence of the analyzer operation is stated, which for the first time uses the method of hydrogen volume differential concentration measurement in hydrogen-containing gases transfused by determining the total volume concentration of undetectable components. The scheme of an automatic analyzer, implemented on the basis of an industrial flow chromatograph, is described, which includes a measuring and comparative transfusion cells equipped with fluoroplastic membranes with selective permeability for hydrogen molecules, and a thermoconductometric detector included in chromatograph. Dependencies describing the analyzer signal and technical characteristics of the implemented analyzer are given. The expediency of using the pulsed method of introducing a sample of the analyzed gas and the cyclic operation of the analyzer is discussed. It is concluded that the differential transfusion measurement of the total volumetric concentration of undetectable components when using a thermoconductometric detector provides a 5...10 times decrease in the measurement error of the hydrogen concentration.

Keywords: automatic transfusion analyzer, hydrogen, volume concentration, differential measurement method, undetectable components.

REFERENCES

1. Lipavsky V.N., Berezkin V.G. Avtomaticheskkiye gazovye potokovye khromatografy [Automatic gas flow chromatographs]. Moscow: Khimiya, 1982. 264 p.
2. Tkhorczhevskij V.P. Avtomaticheskij analiz gazov i zhidkostej na khimicheskikh predpriyatiyakh [Automated analysis of gases and liquids in chemical plants]. Moscow: Khimiya, 1976. 272 p.
3. Farzane N.G., Ilyasov L.V., Azim-zade A.Yu. Tekhnologicheskiye izmereniya i pribory [Technological measurements and devices]. Moscow: Vysshaya shkola, 1989. 456 p.
4. Vanya Ya. Analizatori gazov i zhidkostej [Gas and liquid analyzers] / per. s chesh. O.S. Arytunova. Moscow: Energiya, 1970. 552 p.
5. Patent RF 5663 *Analizator kontsentratsii vodoroda v gazovykh sredakh* [Analyzer of hydrogen concentration in gas media]. Ilyasov L.V., Davidenkov A.K. Declared 05.05.2005. Published 10.09.2006, Bulletin No 25.
6. Brazhnikov V.V. Detektory dlya khromatografii [Detectors for chromatography]. Moscow: Mashinostroyeniye, 1992. 320 p.
7. Rukovodstvo po gazovoy khromatografii: v 2 t. [Manual on gas chromatography: in 2 v., v. 1] / ed. E. Leibniz, H.G. Shtruppe. Moscow: Mir, 1981. V. 1. 480 p.
8. Farzane N.G., Ilyasov L.V. Pulse input of the analyzed gas in automatic gas analyzers. *Izmeritelnaya tekhnika*. 1971. № 4, pp. 34–38. (In Russian).

Поступила в редакцию/received: 01.02.2021; после рецензирования/revised: 05.04.2021;
принята/accepted: 08.04.2021

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА КВИТИРОВАНИЯ ПРИ МАКЕТИРОВАНИИ СИСТЕМ ЗВУКОВОЙ СИГНАЛИЗАЦИИ

О.Л. АХРЕМЧИК, д-р техн. наук, И.И. БАЗУЛЕВ, ст. преподаватель

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

© Ахремчик О.Л., Базулев И.И., 2021

Рассматриваются вопросы моделирования и генерации множества звуковых сигналов технологической сигнализации на физическом макете. В ходе макетирования проводятся исследования времени реакции и выполнения последовательности действий оператором при использовании разных видов звуковых сигналов. Авторская методика исследования предусматривает предварительный выбор вида сигнала оператором и последовательную коррекцию вида и параметров сигнала в ходе эксперимента. Звуковые сигналы синтезируются с использованием метода частотной модуляции. Обработка полученных данных показывает, что следует отклонить гипотезу о нормальном законе распределения времени квитирования в пользу альтернативы о логнормальном законе. Проведенные эксперименты свидетельствуют о необходимости индивидуального подбора и настройки звуковых сигналов в системах технологической сигнализации.

Ключевые слова: звуковой сигнал, оператор, система, сигнализация, контроль, управление, параметр.

DOI: 10.46573/2658-5030-2021-77-83

ВВЕДЕНИЕ

Одним из важнейших модулей системы управления технологическим объектом является модуль формирования сигналов сигнализации. На протяжении последних шестидесяти лет сигнализация рассматривается как результат изменения состояния объекта и используется для уведомления оператора о наличии отклонений без особых изменений в логике функционирования [1]. **На сигнализацию возлагаются две задачи:** привлечь внимание оператора к факту наступления события, требующего вмешательства в работу системы управления, и дать оператору начальную информацию о событии. Применяются три вида сигнализации: контрольная, предупредительная и аварийная [1]. Как правило, сигнал при срабатывании сигнализации является комбинацией светового и звукового сигналов, формируемых подсистемами световой и звуковой сигнализаций. Квитирование представляет собой нажатие на кнопку съема звукового сигнала с последующим его выключением и сохранением информации о причине срабатывания сигнализации.

В условиях возрастающей информационной нагрузки на оператора вопросы выбора и формирования правильной стратегии действий при срабатывании технологической сигнализации во многом определяются видом сигнала, опытом работы в контексте задач ликвидации причины и минимизации последствий появления отклонений. Задачей исследования являлось определение влияния вида сигнала на параметры закона распределения времени квитирования, включающего как простой съем (гашение) сигнала, так и последовательность простых действий оператора после

появления сигналов, связанных с последовательным нажатием кнопок на панели оператора по заданному алгоритму блокировки работы оборудования.

ОПИСАНИЕ МАКЕТА

Для исследования систем сигнализации и выбора типов акустических сигналов на кафедре автоматизации технологических процессов ТвГТУ разработан физический макет. На компьютере макета установлено авторское программное обеспечение (ПО) для измерения и хранения времени выполнения действий оператором [2]. Контроль состояния объекта управления осуществляется с помощью компонентов среды разработки SCADA/HMI DataRate, которая позволяет осуществить обмен данными по технологии OPC DA/HDA; визуализацию изменений и трендов сигналов с формированием звуковых сигналов по технологии семплинга [3]. Данная технология предусматривает предварительный синтез сигналов и их хранение в виде файлов базы данных сигналов. Разработчики системы DataRate используют в своих работах термин «аларм» вместо словосочетаний «сигнал сигнализации»/«аварийный сигнал», рассматривая его как предупреждение о важном событии, в ответ на которое нужно срочно предпринять некоторые действия, в том числе квитирование [3]. Воспроизведение сигнала звуковой сигнализации в макете является результатом отклонения параметров и координат состояния объекта контроля.

Сигналы сигнализации в макете классифицируются на подтвержденные (оператор вводит команду подтверждения) и неподтвержденные. Таким образом, при макетировании рассматривается не простое нажатие на кнопку съема сигнала, а последовательность нажатий на несколько кнопок, имитирующая ввод команды подтверждения.

Альтернативным вариантом представления информации оператору в макете является использование вместо ЭВМ малоформатной панели видеографической станции (рис. 1). В случае применения панелей оператора для определения времени реакции применяется протокол событий станции [4]. Протокол имеет два вида полей: сообщений о событиях и времени наступления событий. В случае использования видеографической станции в макете отсутствуют автоматическая рандомизация возмущений и ведение баз данных операторов и результатов эксперимента.

Настройка системы сигнализации осуществляется таким образом, чтобы срабатывание звукового сигнала происходило при выходе значения контролируемого параметра за заданную границу (на рис. 1 выделена красным). Одновременно со срабатыванием сигнализации на панели отображения состояния дискретных входов-выходов визуализируются результаты их изменения при действиях оператора. При отклонениях параметров последовательности действий в макете предусмотрена возможность изменения вида и/или параметров звукового сигнала при неизменном визуальном отображении.

С точки зрения эргономики прием аварийного сигнала рассматривается как формирование единого перцептивного образа [5], поэтому звук является неотъемлемой частью данного образа. В рамках восприятия и осознания звукового образа человек способен воспринимать и правильно идентифицировать от 16 до 25 градаций тональных сигналов, различающихся по высоте или громкости [6]. Наличие монотонного труда и отсутствие событий в течение длительного времени приводит к снижению работоспособности и повышению вероятности неправильных действий оператора. Возникают предпосылки для разработки систем сигнализации с множеством звуковых сигналов для каждого события [7].

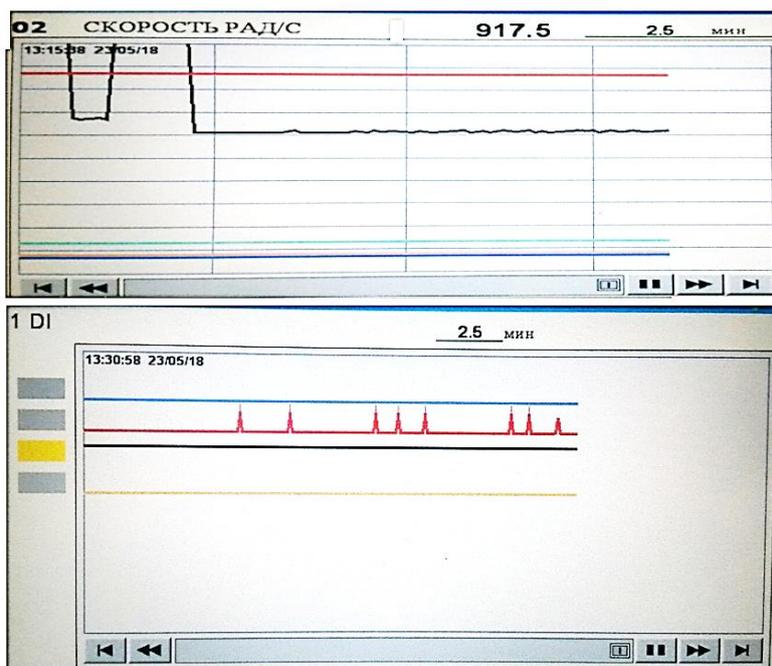


Рис. 1. Внешний вид панелей макета при превышении значения контролируемого параметра (скорости двигателя)

Формирование непрерывного звукового сигнала для базы данных сигналов осуществляется на основе модуляции его параметров и аддитивного использования нескольких гармоник. Метод частотной модуляции применяется для создания непрерывного сигнала с постепенным увеличением или уменьшением частоты звука. Данная модель предусматривает изменение развертки несущей частоты в ограниченном частотном диапазоне в зависимости от вида сигнала (срабатывания предупредительной, уведомительной или аварийной сигнализации).

Модель звукового сигнала при частотной модуляции

$$s(t) = A_m \cos \left(2\pi t \left(f_0 - \frac{\Delta f}{2} \right) + \frac{\Delta f t}{2T_c} \right),$$

где t – время; A_m – амплитуда сигнала; $B = 2\pi\Delta f/T_c$ – скорость изменения частоты при воспроизведении сигнала; Δf – девиация частоты; f_0 – несущая частота; T_c – длительность воспроизведения сигнала.

При моделировании сигналов в макете девиация Δf изменяется на основе продукционных правил, использующих в качестве аргументов величины и значимости отклонения, время квитирования, число допущенных ошибок, значимости потерь в результате ошибок.

ПРОВЕДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА ПРИ МАКЕТИРОВАНИИ

В ходе исследований рассматривались три класса звуковых сигналов, формируемых при срабатывании предупредительной, уведомительной и аварийной сигнализаций. Последовательность времени квитирования на звуковые сигналы соответствующих сигнализаций $\{x_1, x_2, x_3\}$ составила массив для исследования. Предполагается, что вероятность совместного срабатывания разных сигнализаций мала и поэтому в каждый момент времени оператору поступает только один звуковой сигнал. В качестве

функции отклика рассматривается время выполнения последовательности действий, связанных с выполнением операции квитирования сигнализации.

Методика проведения эксперимента предусматривает шесть шагов. Первым шагом методики является формирование массива звуковых сигналов. Для этих сигналов вид сигнала определяют на основе языка сигналов, основанного на категориях сообщений, которые классифицируют в соответствии с их серьезностью (приоритетом). Разному приоритету соответствуют различные громкости и частоты сигналов. При выборе приоритета в ходе макетирования использовался подход специалистов фирмы АВВ, при котором приоритет основывается как на последствиях аварийного сигнала, так и на времени, допустимом для вмешательства оператора [8].

Выбор сигнала производился на основании индивидуальных предпочтений операторов, установленных в ходе предварительного опроса. В качестве сигналов звуковой сигнализации выбраны прерывистый сигнал в виде звука частотой 800 Гц в течение 0,5 с и паузой 1 с (сигнал 1) и постоянный сигнал в виде звука частотой 2 000 Гц (сигнал 2).

Второй шаг предусматривает знакомство оператора с системой контроля и управления (на примере системы управления электроприводом конвейера в условиях помех в виде шума работы двух электродвигателей) и проведение предварительного эксперимента, направленного на тренировку оператора с последующим определением числа параллельных испытаний в точках плана основного эксперимента. Данный шаг основан на общем принципе становления моторных навыков в процессе тренировки [9].

Третий шаг методики проведения эксперимента включает выдвижение проверяемой гипотезы (например, об отсутствии влияния вида сигнала на время выполнения действий) и модификацию плана эксперимента под конкретные условия испытаний (определение числа испытаний и уровней варьирования факторов).

Четвертый шаг заключается в проведении эксперимента, предусматривающего случайное изменение контролируемого параметра (скорости электродвигателя привода конвейера) выше допустимого предела, связанное с этим формирование звукового сигнала и контроль времени выполнения действий оператором по устранению причин отклонения. На этом шаге последовательно проходят стадии начала, проведения и завершения эксперимента (рис. 2). Стадии связаны с активизацией таймера, выдачей сигнала и измерением и записью временных интервалов.

Оператор при проведении исследования обрабатывает информацию на уровнях восприятия и декодирования сигналов [10]. В ходе эксперимента происходит переключение сознания с восприятия на осознание выбора последовательности действий, время квитирования является временем сложной моторной реакции.

Пятый шаг методики заключается в обработке результатов, принятии решения о справедливости выдвинутых гипотез. Обработка предусматривает получение статистических характеристик времени квитирования. Получение и анализ данных характеристик является первой фазой проектирования человеко-машинных систем, в том числе систем сигнализации.

Шестой шаг предусматривает формулировку выводов и рекомендаций по результатам исследования системы звуковой сигнализации. На данном шаге может потребоваться изменение мнемосхемы или элемента изображения мнемосхемы панели оператора.

Для обработки использовалось время выполнения тестовой задачи, регистрируемое как интервал между выполнением первой и последней операций, предписанных процедурой квитирования, либо как интервал от начала действий до момента восстановления процесса в первоначальное состояние. Такой подход применяется при разработке систем сигнализации в нефтехимическом производстве [12].



Рис. 2. Последовательность и стадии проведения эксперимента

В ходе макетирования систем сигнализации получены данные о времени выполнения последовательности действий разными операторами для различных видов сигналов. Объединенная выборка позволяет рассматривать закон распределения времени как композиционный. Кривая плотности распределения времени квитирувания для всех операторов (в эксперименте принимали участие шесть человек) симметричная с точками перегиба. Анализ законов распределения времени квитирувания отдельными операторами показал отклонения законов выборочных распределений от закона распределения объединенных выборок. Проверка гипотезы о законе распределения времени квитирувания для отдельных операторов с помощью критерия Колмогорова – Смирнова позволяет с вероятностью 95 % утверждать, что время выполнения действий при квитирувании подчиняется логарифмически нормальному распределению.

Отличия времени выполнения действий разными операторами незначительны, но в силу индивидуальных особенностей отдельные операторы по-разному квитируют сигнал при разных видах звука.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При выборе предпочтительного вида звукового сигнала операторы выбирают разные виды сигналов, ориентируясь на индивидуальные предпочтения. Обработка значений времени действий при квитирувании сигнала в совместной выборке показывает, что совместное распределение является симметричным с пологими, имеющими точку перегиба ветвями кривой плотности распределения вероятности времени реакции. Частные выборки для отдельных операторов имеют несимметричность с удлиненной правой ветвью функции плотности распределения вероятности, что не позволяет рассматривать моду и медиану в качестве оценок центра распределения.

На основе результатов макетирования можно констатировать, что имеются различия времени выполнения действий операторами при разном виде звуковых сигналов.

Проведенные исследования показывают необходимость настройки параметров сигналов после их выбора оператором с целью уменьшения среднего времени квитирования, что требует формирования панели настройки для контроля действий оператора при работе в составе системы управления технологическим объектом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Баклушин П.А. Автоматизация теплоэнергетических установок. М.: Госэнергоиздат, 1960. 354 с.
2. Ахремчик О.Л., Базулев И.И. Программный комплекс для измерения времени аудиомоторных реакций операторов систем управления химико-технологическими процессами // *Программные продукты и системы*. 2017. Т. 30. № 2. С. 328–332.
3. Слета В., Гурьянов Л. От измерения и обработки тегов к объектам и быстрой разработке автоматизированных систем // *Control Engineering Россия*. 2015. № 6. С. 20–23.
4. Громов Д.В., Желтухин А.А. Видеографическая станция регистрации данных с распределенной архитектурой Интеграф 1000 // *Информатизация и системы управления в промышленности*. 2012. № 5. С. 16–20.
5. Kałamała P., Sadowska A., Ordziniak W., Chuderski A. Gestalt effects in visual working memory // *Experimental Psychology*. 2017. V. 64 (1). P. 5–13.
6. Card S.K., Moran T.P., Newell A. The psychology of human-computer interaction. Hillsdale, NJ: Erlbaum, 1983. 469 p.
7. Ахремчик О.Л., Базулев И.И. Расширение пространства выбора тональных сигналов для систем технологической сигнализации на основе промышленных контроллеров // *Промышленные АСУ и контроллеры*. 2019. № 2. С. 41–46.
8. Холлендер М., Бьютель К. Интеллектуальная аварийная сигнализация // *АББ Ревю*. 2007. № 1. С. 20–23.
9. Бернштейн Н.А. Очерки по физиологии движений и физиологии активности. М.: Медицина, 1966. 349 с.
10. Бакаев М.А., Разумникова О.М. Определение сложности задач для зрительно-пространственной памяти и пропускной способности человека-оператора // *Управление большими системами*. 2017. № 70. С. 25–57.
11. Jamieson G.A. Ecological interface design for petrochemical process control: an empirical assessment // *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics. Systems and Humans*. 2007. V. 37. № 6. P. 906–920.

Для цитирования: Ахремчик О.Л., Базулев И.И. Исследование процесса квитирования при макетировании систем звуковой сигнализации // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2021. № 2 (10). С. 77–83.

ACKNOWLEDGEMENT PROCESS RESEARCH UNDER THE PHYSICAL MODELLING OF SOUND SIGNALING

O.L. AKHREMCHIK, Dr. Sc., I.I. BASULEV, Sen. Lecturer

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

Questions of modeling and generation of a set of sound signals of technological signaling on the physical model are considered. During prototyping researches of an operator response time and execution of the sequence of actions by the operator

*Вестник Тверского государственного технического университета.
Серия «Технические науки». № 2 (10), 2021*

when using different types of sound signals are conducted. The author's technique of a research includes preliminary selection of signal type and correction of signal parameters during the experiment. Sound signals are synthesized with use of method of frequency modulation. Experimental data processing showed that it is necessary to reject a hypothesis of the normal distribution of time of handshake in favor of an alternative about the logarithmically normal law. The made experiments testify to need of individual selection and setup of sound signals for the systems of technological signaling.

Keywords: sound signal, operator, system, signaling, checking, control, parameter.

REFERENCES

1. Baklushin P.A. Avtomatizatsiya teploenergeticheskikh ustanovok [Automation of thermal power plants]. Moscow: Gosenergoizdat, 1960. 354 p.
2. Akhremchik O.L., Bazulev I.I. Software complex for measuring the time of audio-motor reactions of operators of control systems of chemical-technological processes. *Programmnye produkty i sistemy*. 2017. V. 30. No 2, pp. 328–332. (In Russian).
3. Sleta V., Guryanov L. From measurement and processing of tags to objects and rapid development of automated systems. *Control Engineering Rossiya*. 2015. No 6, pp. 20–23. (In Russian).
4. Gromov D.V., Zheltukhin A.A. Videographic data recording station with distributed architecture Integraf 1000. *Informatizatsiya i sistemy upravleniya v promyshlennosti*. 2012. No 5, pp. 16–20. (In Russian).
5. Kałamała P., Sadowska A., Ordziniak W., Chuderski A. Gestalt effects in visual working memory. *Experimental Psychology*. 2017. V. 64 (1), pp. 5–13.
6. Card S.K., Moran T.P., Newell A. The psychology of human-computer interaction. Hillsdale, NJ: Erlbaum, 1983. 469 p.
7. Akhremchik O.L., Bazulev I.I. Expansion of the space for selecting tones for process signaling systems based on industrial controllers. *Promyshlennye ASU i kontrolyery*. 2019. No 2, pp. 41–46. (In Russian).
8. Hollender M., Butel K. Intelligent alarm system. *ABB Revyu*. 2007. No 1, pp. 20–23. (In Russian).
9. Bernstein N.A. Ocherki po fiziologii dvizheniy i fiziologii aktivnosti [Essays on the physiology of movements and the physiology of activity]. Moscow: Meditsina, 1966. 349 p. (In Russian).
10. Bakaev M.A., Razumnikova O.M. Determination of the complexity of tasks for visual-spatial memory and the throughput of a human operator. *Upravlenie bolshimi sistemami*. 2017. No 70, pp. 25–57. (In Russian).
11. Jamieson G.A. Ecological interface design for petrochemical process control: an empirical assessment. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics. Pt. A: Systems and Humans*. 2007. V. 37. No 6, pp. 906–920.

Поступила в редакцию/received: 11.02.2021; после рецензирования/revised: 05.04.2021;
принята/accepted: 08.04.2021

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА КАМЕРЫ ДЛЯ СЖАТИЯ ГАЗОВ КОМПЬЮТЕРНОГО ЭФФУЗИОННОГО АНАЛИЗАТОРА ПЛОТНОСТИ ГАЗОВ С УБЫВАЮЩИМ ДАВЛЕНИЕМ ИСТЕЧЕНИЯ

Л.В. ИЛЯСОВ¹, д-р техн. наук, С.Ю. ЖИГУЛИН², инженер,
Н.И. ИВАНОВА¹, канд. техн. наук

¹Тверской государственный технический университет,
170026, Тверь, наб. Аф. Никитина, д. 22, e-mail: lvi450714@mail.ru

²ООО «НПЦ «Система»», 170039, Тверь,
ул. П. Савельевой, д. 64, e-mail: shtazig@mail.ru

© Илясов Л.В., Жигулин С.Ю., Иванова Н.И., 2021

Статья посвящена результатам исследования теплового режима камеры для сжатия газов эффузионного анализатора плотности газов. Приведены математическое описание эффузионного преобразователя плотности газов и принятые при его разработке допущения. Описана экспериментальная установка для исследований теплового режима камеры для сжатия газов эффузионного анализатора плотности газов и ее работа. Представлены результаты измерений температуры в камере анализатора во время экспериментальных исследований, имитирующих процесс работы анализатора, на разработанной установке для ряда газов. Определены максимальное изменение температуры в ходе анализа и продолжительность процесса, сделаны выводы о влиянии изменения температуры на точность измерений плотности газов разработанным анализатором и о необходимости использования системы стабилизации температуры в конструкции эффузионных анализаторов плотности газов.

Ключевые слова: эффузионный анализатор, плотность, газ, математическое описание, температура.

DOI: 10.46573/2658-5030-2021-84-92

ВВЕДЕНИЕ

Одним из самых удобных и экологичных видов топлив является природный газ. Он также находит широкое применение в качестве сырья при производстве удобрений, красок и различных полуфабрикатов. Не в меньшей степени в различных отраслях промышленности используются и другие газы.

При добыче, переработке, транспортировке и производстве различных газов и газовых смесей важным является определение их плотности как на потоках, так и при лабораторном контроле.

Наиболее широко применяемыми принципами контроля плотности газов при лабораторном контроле на сегодняшний день являются пикнометрический [1–3] и хроматографический [3–5], при этом известен и ряд других [6–13]. Измерение плотности газов пикнометрами – приборами, основанными на пикнометрическом методе контроля, занимает довольно большой промежуток времени и требует сложных подготовительных операций. Определение плотности газов путем хроматографического анализа применяется в основном только для контроля плотности природных газов и к тому же требует использования дорогостоящего оборудования.

В ходе многочисленных исследований на кафедре автоматизации технологических процессов Тверского государственного технического университета было выявлено, что приборы для лабораторного контроля плотности газов, основанные на другом принципе контроля – эффузионном, являются более удобными, простыми по сравнению с указанными выше и при этом не менее точными.

В результате исследований эффузионных средств контроля плотности газов был разработан компьютерный эффузионный анализатор плотности газов. Для измерения давления газов в процессе истечения в нем использовался высокоточный пьезорезистивный датчик давления, сигнал которого подвергался компьютерной обработке [14]. В ходе разработки данного анализатора было создано и экспериментально проверено математическое описание эффузионного преобразователя плотности газов [15], которое имеет вид:

$$P = \frac{\frac{\tau\sqrt{T}}{e^{\sqrt{\rho_n}A}} (2P_0 - P_a + 2\sqrt{P_0^2 - P_a P_0})^2 + 2e^{\sqrt{\rho_n}A} (2P_0 - P_a + 2\sqrt{P_0^2 - P_a P_0})P_a + P_a^2}{\frac{\tau\sqrt{T}}{4e^{\sqrt{\rho_n}A}} (2P_0 - P_a + 2\sqrt{P_0^2 - P_a P_0})} ;$$

$$A = -\frac{Vv_\mu}{R_\mu \alpha F \sqrt{2 \frac{T_n}{P_n}}}; \quad \tau = -\frac{Vv_\mu \sqrt{\rho_n}}{R_\mu \alpha F \sqrt{2 \frac{T_n T}{P_n}}} \cdot \ln \left| \frac{2P - P_a + 2\sqrt{P^2 - P_a P}}{2P_0 - P_a + 2\sqrt{P_0^2 - P_a P_0}} \right|, \quad (1)$$

где τ – время, прошедшее с момента начала истечения; ρ_n – плотность газа в нормальных условиях; P_a – атмосферное давление; F – площадь поперечного сечения диафрагмы; P_0 – абсолютное давления газа в начале истечения; P – абсолютное давления газа через время τ с момента начала истечения; α – коэффициент расхода диафрагмы; T_n и P_n – абсолютные температура и давление газа в нормальных условиях.

При разработке данного математического описания были приняты следующие допущения:

- процесс уменьшения давления в камере для сжатия газов изотермический;
- сжимаемостью газа можно пренебречь;
- вместимость камеры для сжатия газов постоянна.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для проверки правильности допущения об изотермическом характере истечения газов из анализатора, а также для принятия обоснования решения о наличии или отсутствии необходимости системы стабилизации температуры газа в анализаторе были проведены экспериментальные исследования, которые выполнялись на установке, описанной в работе [8]. Данная экспериментальная установка (рис. 1) содержала камеру для сжатия газов 1, выполненную в виде разделенного перегородками на несколько последовательных сообщающихся камер стального цилиндра с внутренним объемом 350 мл. Выход камеры для сжатия газов через тройник 2 сообщался с входами измерительной камеры датчика давления 3 и микродиафрагмы 4. На выходах измерительной камеры датчика давления и микродиафрагмы, изготовленной из тонкой алюминиевой фольги, располагались пневмотумблеры 5 и 6. К измерительной камере

был подключен пьезорезистивный датчик давления 7, сигнал с которого после усиления усилителем 8 и преобразования аналого-цифровым преобразователем (АЦП) 9 поступал на компьютер 10. К входу камеры для сжатия газов через пневмотумблер 11 был подключен микрокомпрессор 12, соединенный с линией для подачи газа 13. Дополнительно установка содержала хромель-копелевую термопару 14, помещенную в камеру для сжатия газов и соединенную с потенциометром 15.

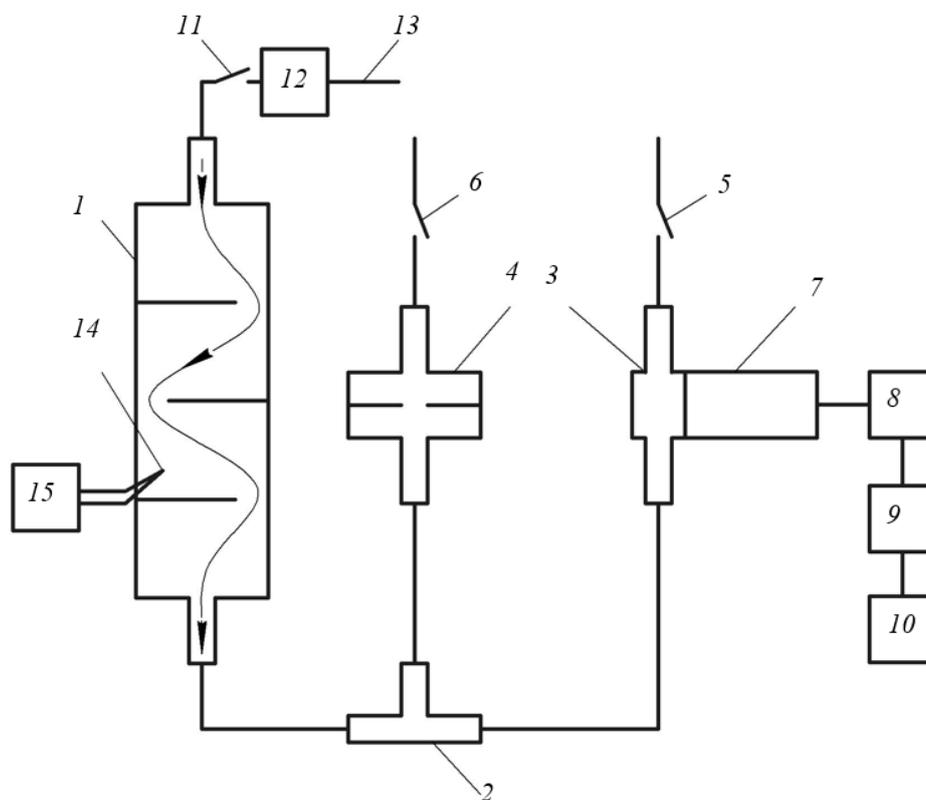


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для исследования теплового режима в камере для сжатия газов эффузионного анализатора плотности газов

Проверка правильности допущения об изотермическом характере истечения газа из анализатора на описанной установке осуществлялось следующим образом. К линии для подачи газа подсоединялась емкость с анализируемым газом. С помощью пневмотумблера 11 микрокомпрессор соединялся с входом камеры для сжатия газов, а с помощью пневмотумблеров 5 и 6 выходы микродиафрагмы и измерительной камеры датчика давления соединялись с атмосферой. Затем включался микрокомпрессор, и анализируемый газ перекачивался из емкости с анализируемым газом через емкость для сжатия газов, микродиафрагму и измерительную камеру в атмосферу и промывал их. По прошествии некоторого промежутка времени, достаточного для промывки, измерительная камера посредством пневмотумблера 6 и микродиафрагма с помощью пневмотумблера 5 отключались от атмосферы. Микрокомпрессор начинал создавать избыточное давление в камере для сжатия газов. При этом одновременно повышалось давление и в измерительной камере датчика давления. Давление непрерывно измерялось пьезорезистивным датчиком давления, сигнал которого усиливался усилителем и после преобразования в АЦП поступал на компьютер, на мониторе которого отображался в виде графика зависимости давления в измерительной камере датчика давления от времени. Одновременно с этим с помощью термопары и

потенциометра непрерывно измерялась и фиксировалась температура в камере для сжатия газов. При достижении в измерительной камере датчика давления заранее принятого значения избыточного давления (25 кПа) вход камеры для сжатия газов с помощью пневмотумблера 11 отключался от микрокомпрессора, после чего микрокомпрессор выключался. После установления в камере для сжатия газов постоянного значения температуры, равного температуре окружающей среды, а следовательно, после возвращения сигнала термопары к начальному уровню с помощью пневмотумблера 5 микродиафрагма соединялась с атмосферой и начиналось истечение газа, при этом давление в измерительной камере датчика давления начинало уменьшаться. В то же время начинала снижаться и температура в камере для сжатия газов. Информация о значении температуры в камере для сжатия газов также фиксировалась с помощью термопары и потенциометра. По окончании истечения газа и возвращении температуры в камере для сжатия газов к начальному значению ее измерение прекращалось.

По описанной методике исследовались процессы сжатия и истечения природного газа, пропан-бутановой смеси, углекислого газа, а также осушенного воздуха. Все исследования проводились в лаборатории при температуре окружающей среды 20 °С.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На рис. 2–5 в качестве примера показаны полученные в ходе экспериментальных исследований графики зависимости изменения температуры, которая измерялась термопарой, размещенной в камере для сжатия газов, от времени, а в таблице приведены обобщенные результаты исследования.

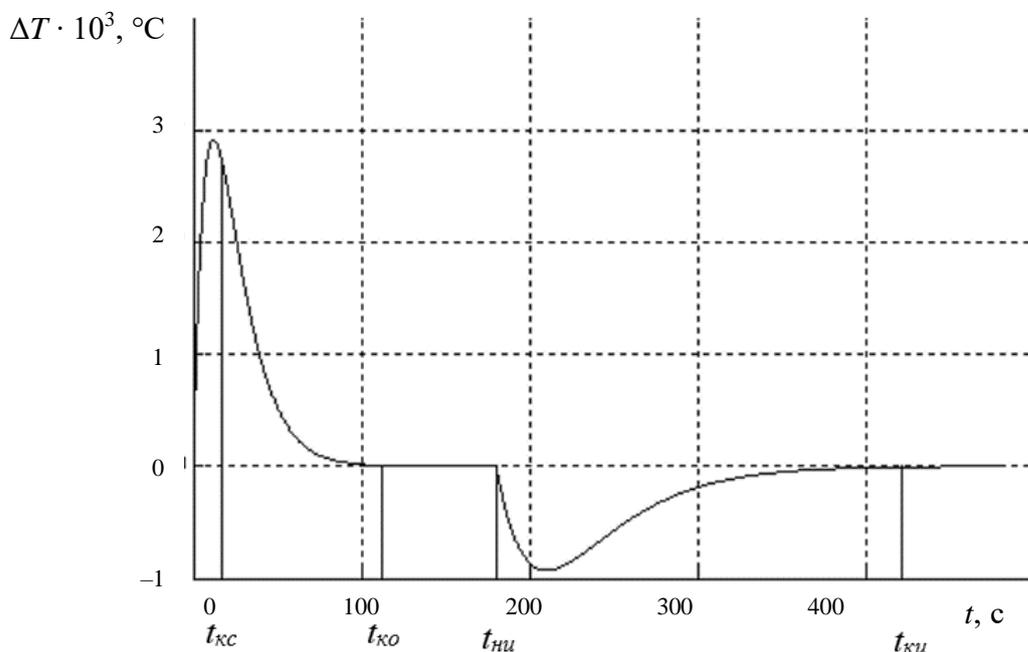


Рис. 2. График зависимости изменения температуры от времени в процессе истечения осушенного воздуха

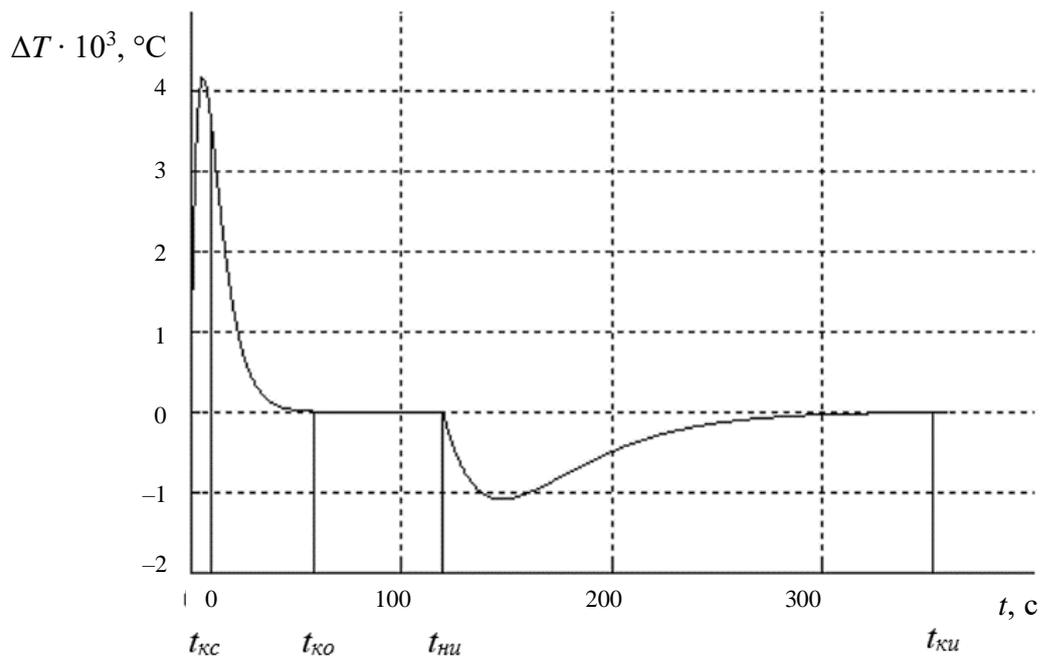


Рис. 3. График зависимости изменения температуры от времени в процессе истечения природного газа

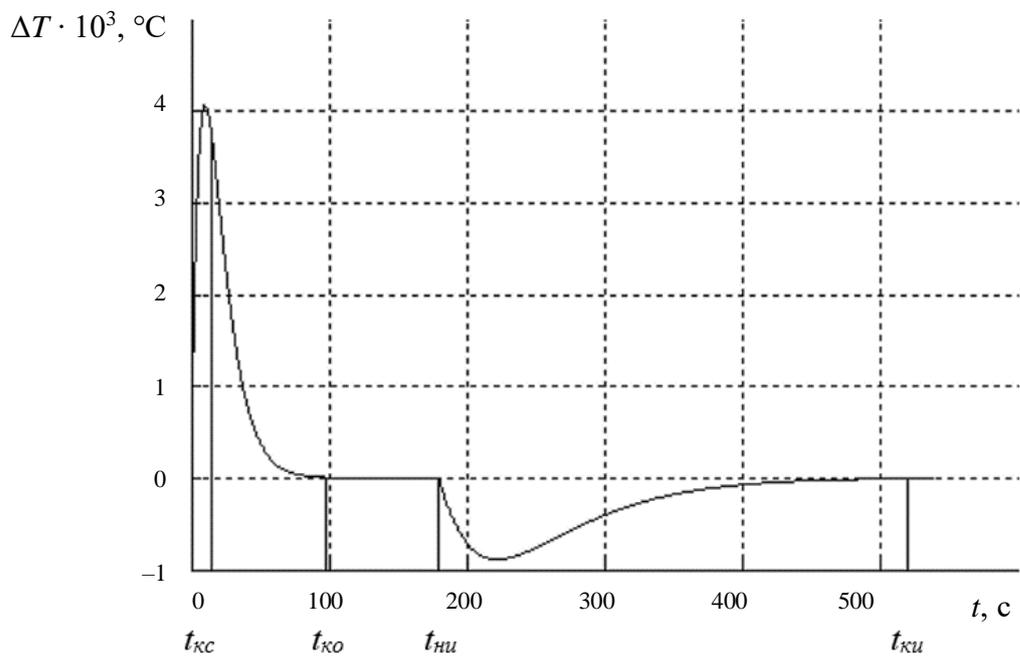


Рис. 4. График зависимости изменения температуры от времени в процессе истечения технического углекислого газа

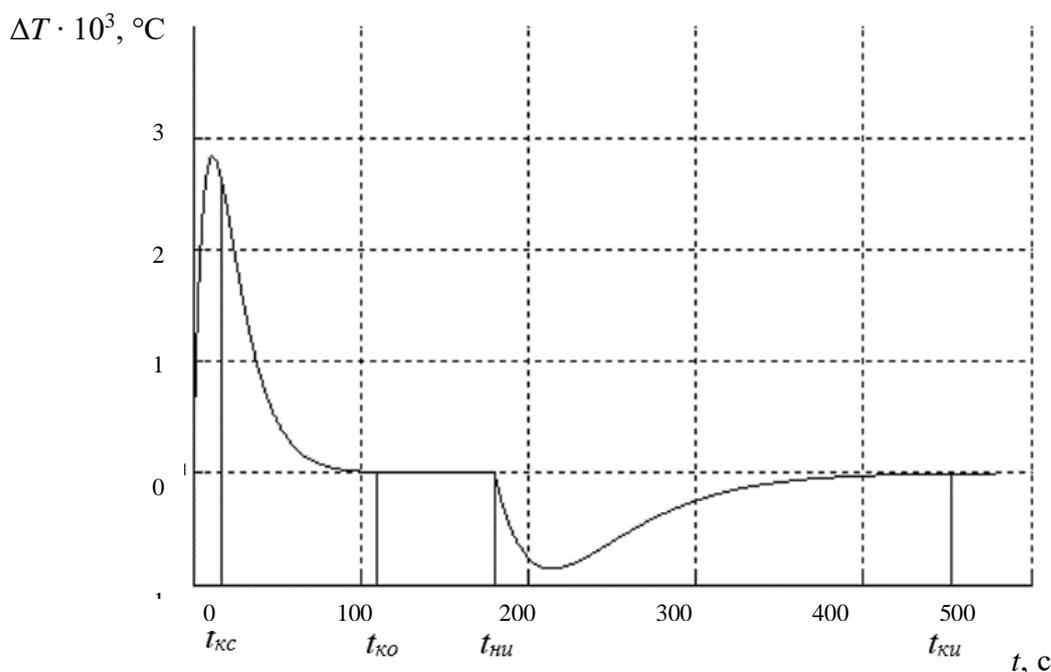


Рис. 5. График зависимости изменения температуры от времени в процессе истечения пропан-бутановой смеси

Результаты исследования

Газ	Время остывания газа до температуры окружающей среды с момента начала сжатия газа, с	Максимальное изменение температуры газа в процессе его истечения, °C
Осушенный воздух	112	0,93
Природный газ	58	1,09
Технический углекислый газ	97	0,88
Пропан-бутановая смесь	109	0,85
Среднее значение для всех исследованных газов	94	0,94

Как видно из графиков и таблицы, газ даже в отсутствии системы стабилизации температуры начинает остывать еще до окончания процесса сжатия (точка $t_{кс}$), а время окончания сжатия (точка $t_{кс}$) до установления постоянной температуры в камере для сжатия газов 1 (точка $t_{ко}$) не превышает 2 мин для всех исследованных газов. Результаты исследования также показывают, что температура в процессе истечения газов изменяется незначительно и практически одинакова для различных газов. Основные изменения температуры происходят в начале процесса истечения, в конце истечения температура газа практически не меняется; следовательно, если для определения плотности не использовать начальный участок кривой истечения, то изменением температуры можно пренебречь.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты позволяют сделать вывод о малом влиянии изменения температуры на точность измерения плотности газов эффузионными анализаторами плотности газов. Это свидетельствует о правильности принятого допущения об изотермическом характере истечения газа из камеры для сжатия газов, а также об отсутствии необходимости в системе стабилизации температуры в анализаторе, что позволяет существенно упростить его конструкцию и уменьшить размеры.

ЛИТЕРАТУРА

1. Viana M., Jouannin P., Pontier C., Chulia D. About pycnometric density measurements // *Talanta*. 2002. V. 57. № 3. P. 583–593.
2. Hwang C.A., Simon P.P., Hou H., Hall K.R., Holste J.C., Marsh K.N. Burnett and pycnometric (p, Vm, T) measurements for natural gas mixtures // *The Journal of Chemical Thermodynamics*. 1997. V. 29. № 12. P. 1455–1472.
3. Хацкевич Е.А., Снегов В.С. Погрешности результатов измерений плотности природного газа пикнометрическим и расчетным методами // *Газовая промышленность*. 2011. № 5. С. 84–85.
4. Астахов А. Анализ физико-химических свойств природного газа // *Аналитика*. 2013. Т. 8. № 1. С. 40–45.
5. Клепча Р.Р. Методика проведения измерений потоковым хроматографом для ГИС с расширенным диапазоном изменений компонентного состава газа // *Автоматизация в промышленности*. 2013. № 6. С. 34–35.
6. Билинский И.И., Огородник К.В., Яремисшена Н.А. Анализ методов и средств измерения плотности нефтепродуктов // *Научные труды Винницкого национального технического университета*. 2016. № 2. С. 10–23.
7. Фарзани Н.Г., Илясов Л.В., Азим-заде А.Ю. Технологические измерения и приборы: учебник. М.: Альянс, 2017. 456 с.
8. Сажин С.Г. Приборы контроля состава и качества технологических сред: учеб. пособие. СПб.: Лань, 2012. 431 с.
9. Farzaneh-Gord M., Farsiani M., Khosravi A., Arabkoohsar A., Dashti F. A novel method for calculating natural gas density based on Joule Thomson coefficient // *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 2015. V. 26. P. 1018–1029.
10. Badarlis A., Pfau A., Kalfas A. Measurement and evaluation of the gas density and viscosity of pure gases and mixtures using a micro-cantilever beam // *Sensors*. 2015. V. 15. № 9. P. 24318–24342.
11. Rosario R., Mutharasan R. Piezoelectric excited millimeter sized cantilever sensors for measuring gas density changes // *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2014. V. 192. P. 99–104.
12. Khosravi A., Machado L., Nunes R.O. Estimation of density and compressibility factor of natural gas using artificial intelligence approach // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2018. V. 168. P. 201–216.
13. Ötügen M.V., Ganguly B. Laser heterodyne method for high-resolution gas-density measurements // *Applied optics*. 2001. V. 40. № 21. P. 3502–3505.
14. Жигулин С.Ю., Илясов Л.В. Экспериментальная установка для исследования компьютерного эффузионного анализатора плотности газов с убывающим давлением истечения // *Вестник Тверского государственного технического университета*. 2018. № 1 (33). С. 22–25.

15. Жигулин С.Ю., Илясов Л.В. Экспериментальная проверка математической модели компьютерного эффузионного анализатора плотности газов с убывающим давлением истечения // *Измерительная техника*. 2020. № 3. С. 57–63.

Для цитирования: Илясов Л.В., Жигулин С.Ю., Иванова Н.И. Экспериментальное исследование теплового режима камеры для сжатия газов компьютерного эффузионного анализатора плотности газов с убывающим давлением истечения // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2021. № 2 (10). С. 84–92.

EXPERIMENTAL RESEARCH OF THE GAS COMPRESSION CHAMBER THERMAL REGIME OF THE COMPUTER EFFUSION DECREASING DISCHARGE PRESSURE GAS DENSITY ANALYZER

L.V. ILYASOV¹, Dr. Sc., S.Yu. ZHIGULIN², engineer,
N.I. IVANOVA¹, Cand. Sc.

¹Tver State Technical University, 22, Af. Nikitin emb.,
170026, Tver, Russian Federation, e-mail: lvi450714@mail.ru
²Sistema Scientific and Production Center LLC, 170039, Tver,
st. P. Savelyeva, 64, e-mail: shtazig@mail.ru

The article is devoted to the results of the research of the gas compression chamber thermal regime of the computer effusion decreasing discharge pressure gas density analyzer. The mathematical description of the effusion gas density transducer and its assumptions are given. An experimental setup for studying of the gas compression chamber thermal regime of the computer effusion decreasing discharge pressure gas density analyzer and its operation is described. The results of temperature measurements in the analyzer chamber during experimental studies simulating the process of the analyzer operation on the developed installation for a number of gases are presented. The maximum temperature changes during the analysis process and its duration are determined, conclusions are drawn about the influence of temperature changes on the accuracy of gas density measurements by the developed analyzer and about the necessity to use a temperature stabilization system in the design of effusion gas density analyzers.

Keywords: effusion, analyzer, density, gas, computer, mathematical description, temperature.

REFERENCES

1. Viana M., Jouannin P., Pontier C., Chulia D. About pycnometric density measurements. *Talanta*. 2002. No 57, pp. 583–593.
2. Hwang C.A., Simon P.P., Hou H., Hall K.R., Holste J.C., Marsh K.N. Burnett and pycnometric (p, V_m, T) measurements for natural gas mixtures. *The Journal of Chemical Thermodynamics*. 1997. V. 29. No 12, pp. 1455–1472.
3. Khatskevich E.A., Snegov V.S. Errors of measurements of natural gas density using pycnometric and computational methods. *Gazovaia promyshlennost*. 2011. No 5, pp. 84–85. (In Russian).

4. Astakhov A. Analysis of the physico-chemical properties of natural gas. *Analitika*. 2013. V. 8. No 1, pp. 40–45. (In Russian).
5. Klepcha R.R. Measurement technique for flow chromatograph for GIS with an extended range of changes in the composition of the gas. *Avtomatizatsia v promyshlennosti*. 2013. No 6, pp. 34–35. (In Russian).
6. Bilinskii I.I., Ogorodnik K.V., Iaremishena N.A. Analysis of methods and means of measuring the density of petroleum products. *Nauchnye trudy Vinnitskogo natsionalnogo tekhnicheskogo universiteta*. 2016. No 2, pp. 10–23. (In Russian).
7. Farzane N.G. Ilyasov L.V., Azim-zade A.Yu. Tekhnologicheskkiye izmereniya i pribory: uchebnik [Technological measurements and devices: textbook]. Moscow: Alyans, 2017. 456 p.
8. Sazhin S.G. Pribory kontrolya sostava i kachestva tekhnologicheskikh sred: uchebnoye posobiye [Instruments for controlling the composition and quality of technological media: a tutorial]. SPb.: Lan', 2012. 431 p.
9. Farzaneh-Gord M., Farsiani M., Khosravi A., Arabkoohsar A., Dashti F. A novel method for calculating natural gas density based on Joule Thomson coefficient. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 2015. V. 26, pp. 1018–1029.
10. Badarlis A., Pfau A., Kalfas A. Measurement and evaluation of the gas density and viscosity of pure gases and mixtures using a micro-cantilever beam. *Sensors*. 2015. V. 15. No 9, pp. 24318–24342.
11. Rosario R., Mutharasan R. Piezoelectric excited millimeter sized cantilever sensors for measuring gas density changes. *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2014. V. 192, pp. 99–104.
12. Khosravi A., Machado L., Nunes R.O. Estimation of density and compressibility factor of natural gas using artificial intelligence approach. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2018. V. 168, pp. 201–216.
13. Ötügen M.V., Ganguly B. Laser heterodyne method for high-resolution gas-density measurements. *Applied optics*. 2001. V. 40. No 21, pp. 3502–3505.
14. Zhigulin S.Yu., Ilyasov L.V. Experimental installation for the investigation of the computer effusion gas density analyzer with decreasing exhaust pressure. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2018. No. 1(33), pp. 22–25. (In Russian).
15. Zhigulin S.Yu., Ilyasov L.V. Experimental verification of a mathematical model of a computerized decreasing discharge pressure effusion gas density analyzer. *Izmeritelnaya tekhnika*. 2020. No 3, pp. 57–63. (In Russian).

Поступила в редакцию/received: 19.02.2021; после рецензирования/revised: 05.04.2021;
принята/accepted: 08.04.2021

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ БЛОКЧЕЙН В ПРОМЫШЛЕННОСТИ КАК ЧАСТИ ИНДУСТРИИ 4.0

Я.А. НЕСТЕРОВ, аспирант, Н.А. СЕМЕНОВ, д-р техн. наук

Тверской государственной технической университет, 170026, Тверь,
наб. Аф. Никитина, д. 22, e-mail: nesterovyakov1@gmail.com

© Нестеров Я.А., Семенов Н.А., 2021

Рассматривается применение технологии блокчейн как части Индустрии 4.0. Приведены варианты использования технологии блокчейн в промышленности. Рассмотрен феномен квазиблокчейна, сформулированы критерии индустриального применения технологии блокчейн.

Ключевые слова: блокчейн, информационные технологии, квазиблокчейн, наукоемкие организации, промышленность.

DOI: 10.46573/2658-5030-2021-93-98

ВВЕДЕНИЕ

Четвертая промышленная революция, более известная как Индустрия 4.0, подразумевает под собой усиленную интеграцию киберфизических систем в производство, а также изменение самых разных сторон жизни: рынка труда, окружающей среды, политических систем и др. [1].

Киберфизические системы являются комплексным понятием. На сегодняшний день общепринятого и однозначного определения таких систем не существует. Это связано с тем, что они находятся на пересечении нескольких научных дисциплин и направлений и поэтому в зависимости от способа их реализации затрагивают различные аспекты окружающего мира.

Главной определяющей чертой всех киберфизических систем является сопряжение и плотное взаимодействие между физическими и вычислительными процессами. Другими словами, кибернетические системы представляют собой комплекс физических и цифровых (вычислительных) элементов, предназначенный для получения данных из окружающей среды, которые в дальнейшем используются для оптимизации процессов управления.

Индустрия 4.0 характеризуется коренным изменением производственных процессов. Создание киберфизических систем является одним из ключевых достижений четвертой промышленной революции. Способность децентрализованно управлять различными процессами – производством, продажами, закупочной деятельностью, а также самообучаться и развиваться делает наличие киберфизических систем необходимым условием функционирования любого высокотехнологического предприятия.

Для максимальной эффективности функционирования самих киберфизических систем необходимы соответствующие «умные» технологии хранения, обработки и распространения информации. Технология блокчейн, способная гарантировать децентрализацию хранения данных, применяемая сегодня для создания «умных» контрактов и обеспечения кибербезопасности при работе с криптовалютами, стала рассматриваться как одна из ключевых для работы киберфизических систем.

ПРИМЕНЕНИЕ БЛОКЧЕЙН ДЛЯ ОБРАБОТКИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ДАННЫХ

В октябре 2020 года консалтинговая компания Pricewaterhouse Coopers (PwC) представила анализ, согласно которому к 2030 году блокчейн-технологии обеспечат рост мировой экономики на 1,7 трлн долл. В отчете PwC отмечено, что «блокчейн способен помочь многим организациям восстановить и реорганизовать свою структуру» в новых условиях постпандемии [2].

Сегодня технологии блокчейн чаще применяются в банковской сфере – для трансформации финансовых инструментов и операций, корпоративный блокчейн в целом – для реорганизации документооборота и управления цепочками поставок. Однако относительно недавно стал четко прослеживаться новый тренд: слияние технологии блокчейн и других технологий распределенного реестра с процессами автоматизации на промышленных предприятиях.

Российские энергетические и добывающе-обрабатывающие промышленные корпорации по количеству запущенных проектов с использованием технологии блокчейн на 2 % уступают финансовым корпорациям. Эти цифры легко объяснимы: новые технологии в промышленности внедряются гораздо медленнее, поскольку этот процесс сопряжен с определенными трудностями технического характера, с которыми не сталкиваются финансовые организации. Для финансовых организаций внедрение корпоративного блокчейна является естественным этапом в развитии их инфраструктур. Для промышленных же предприятий использование технологии блокчейн и/или технологий распределенных реестров – это шанс подняться на несколько ступеней выше в процессе автоматизации своих структур.

Промышленный интернет, анализ больших объемов данных, технологии распределенных реестров – серьезные технологические лифты, которые активно встраивают в свои бизнес-процессы современные промышленные предприятия. При этом одной из точек взаимодействия может стать совместная работа всех заинтересованных подразделений предприятия с большим объемом данных, которые все активнее собирают на всех уровнях функционирования этого предприятия, однако в дальнейшем не могут использовать в силу специфичности технологических процессов. Проблема структуризации и хранения больших данных при одновременной передаче нескольким пользователям на сегодняшний день стоит достаточно остро. Промышленные данные очень динамичны, особенно данные, собираемые с поточных линий производств, и извлечь их быстро, безопасно и в полном объеме проблематично. Технологии блокчейн частично решают эту проблему и, таким образом, потенциально являются драйверами для построения новых моделей управления на основе доверенных технологических и бизнес-показателей.

Однако учет опыта внедрения технологии блокчейн в финансовом секторе для использования в секторе промышленном сопряжен с определенными трудностями. Некоторые из них могут быть преодолены в рамках существующего поколения технологии блокчейн, однако для полноценного внедрения необходима существенная трансформация технологии, ее комбинирование с другими информационными и промышленными инновациями.

Сложности такой трансформации порождают критику технологии блокчейн и нередко отказ от ее внедрения в полном объеме. Однако инновационную идею блокчейна – блочную организацию реестра транзакций – активно внедряют в традиционные технологии, генерируя тем самым гибридные решения для использования в реальных бизнес-процессах.

ГИБРИДНЫЕ РЕШЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ БЛОКЧЕЙН

В марте 2018 году «Сургутнефтегаз», «Объединенная металлургическая компания» (ОМК) и ОАО «РЖД» запустили пилотный проект по использованию технологии блокчейн [3]. Технология блокчейна в данном случае используется в процессе поставки «Сургутнефтегазу» металлических труб от входящего в ОМК «Выксунского металлургического завода». В этом проекте на блокчейне реализован журнал аудирования этого процесса. Он включает отгрузку труб с завода, их транспортировку, приемку товара и определение наличия/отсутствия брака. В случае обнаружения брака товар отправляется обратно. Транспортировку труб от производителя к заказчику осуществляет ОАО «РЖД».

Задача блокчейна в данном случае – хранить в облаке всю информацию о транзакциях, которые осуществляются в рамках этого процесса. Производитель отмечает в облаке, что товар готов к отгрузке, со стороны РЖД вносится отметка, что товар находится в пути. Когда трубы доставляют в «Сургутнефтегаз», компания ставит отметку о получении. Если в товаре обнаружен брак, отметка об этом также заносится в блокчейн-облако для возврата труб производителю. В облаке хранятся и сертификаты продукции.

У всех участников процесса есть доступ к облаку и возможность посмотреть записи о произведенных транзакциях. Получать доступ к облаку можно с любого устройства (рис. 1).

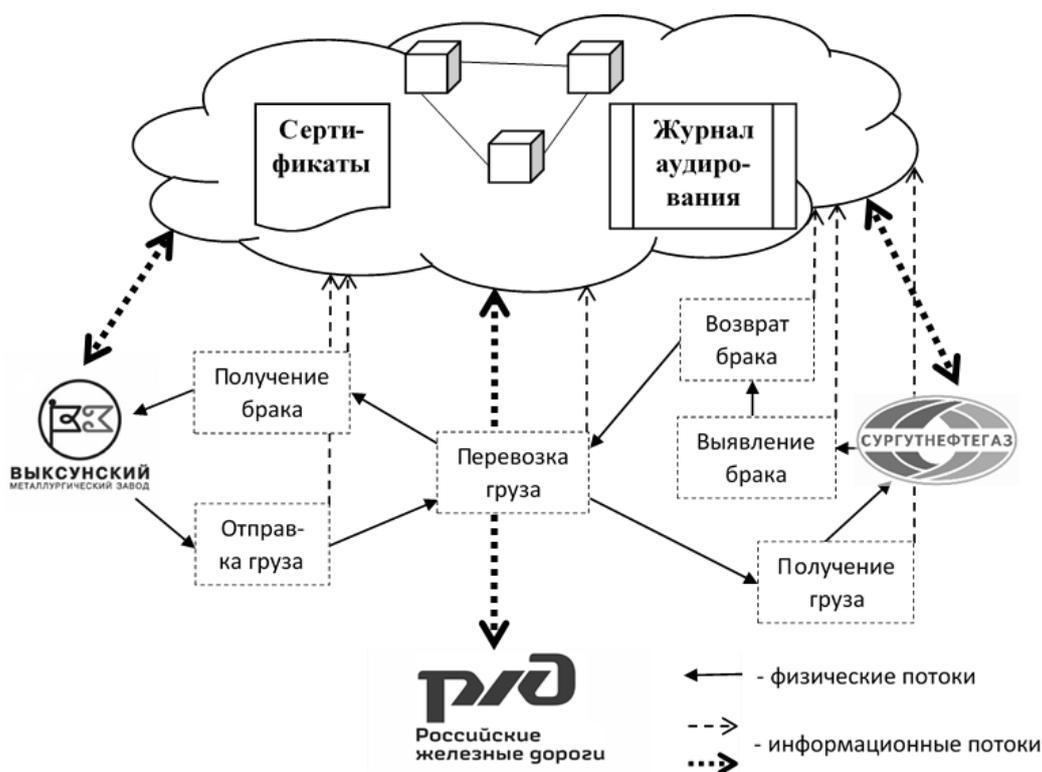


Рис. 1. Схема взаимодействия участников в процессе поставки металлических труб в пилотном проекте, реализованном с помощью технологии блокчейн

В данном случае за счет блокчейна решается задача аудита и контроля контрафакта. В любой момент времени можно поднять информацию об операциях, которые проводились с той или иной трубой и на уровне самого «Сургутнефтегаза», и на уровне поставщика и логистики. Такие решения положено считать неполноценной блокчейн-технологией, получившей в литературе термин «квазиблокчейн» [4].

В квазиблокчейне алгоритмы повышения надежности данных в целом не используются. Квазиблокчейн выступает в роли прикладного инструмента бизнеса, а не стимулом для дальнейшего развития технологии блокчейн. Доверие к содержимому реестра в квазиблокчейне по-прежнему зависит от доверия к хранителю реестра, однако теперь появилась возможность взаимного аудирования в целях повышения уверенности в контрагентах (см. рис. 1).

Такие частично масштабируемые системы сейчас вполне доступны для индустриального использования. Так, например, с июля 2020 года в России планировали ввести обязательную маркировку лекарственных средств. Однако из-за ситуации с пандемией COVID-19 и повышенным спросом на лекарственные препараты в связи с этим участники фармакологического рынка не успели подготовиться к новым правилам оборота и дату обязательной маркировки перенести на 1 января 2021 года [5].

Механизм для отслеживания лекарственных средств от производителя до потребителя также реализован в настоящее время с помощью технологии квазиблокчейн (рис. 2).

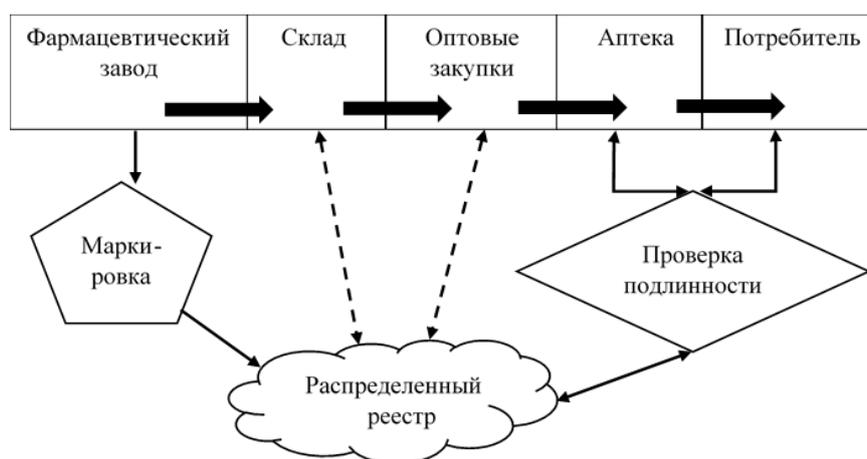


Рис. 2. Использование распределенного реестра для отслеживания лекарственных средств

Теперь любой из участников фармацевтического рынка, от производителя до потребителя, может удостовериться в подлинности препарата. С помощью QR-кода, размещенного на упаковке, стало возможным легко проследить весь путь движения препарата.

Существует мнение, что отслеживание цепочки поставок должно начинаться со стадии принятия сырьевого материала фармацевтическим заводом. Однако именование поставщиков в этом случае – коммерческая тайна, которую не все захотят размещать в открытом доступе. Эту проблему можно обойти, создав для поставщиков сырья либо отдельную цепочку поставок на блокчейне, либо в рамках эксклюзивного блокчейна, где доступ для чтения данных будет ограничен (например, публиковать только информацию о стране – импортере сырья и т.д.).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На практике важно не переоценивать технологию блокчейн в ее сегодняшнем виде, поскольку использование гибридных решений не является в полной мере проводником идеи этой технологии. Исходя из рассмотренных выше областей применения, сформулируем особенности индустриального использования технологии блокчейн:

замена многопользовательской базы данных на распределенный реестр, который будет сформирован с помощью технологии блокчейн. Реестр должен находиться в режиме полного доступа у сторон, которые имеют низкое доверие друг к другу;

квазиблокчейн является усовершенствованной децентрализованной базой данных, и выбор такой архитектуры оправдан при условии принятия верных решений о числе распределенных копий и механизмах консенсуса. При росте количества держателей реестра безопасность повышается, однако производительность снижается, а затраты на построение и эксплуатацию системы растут;

препятствием для использования блокчейна может стать сложная технологическая логика производственных объектов. Сегодняшний уровень развития технологии блокчейн вряд ли позволит автоматизировать все бизнес-кейсы промышленного предприятия. Кроме того, технология «умных» контрактов теряет свою универсальность и гибкость в процессе развития данной технологии;

остается проблема производительности и затратности технологии блокчейн. Все узлы необходимо постоянно вознаграждать за хранение ими реестра и проверку транзакций, поэтому технология становится высокочрезвычайно затратной. Если же таких узлов будет немного, то упадет производительность и встанет вопрос об устойчивости и безопасности.

Для того чтобы технологии блокчейн в сфере промышленности заработали в полном объеме в рамках Индустрии 4.0, необходимо обеспечить продвижение технологии в сторону распределенных, но при этом более высокопроизводительных и эффективных по затратам систем. Это небыстрый и не предопределенный еще путь компромиссных решений, требующих дальнейших исследований технологических и социально-экономических аспектов технологии блокчейн.

ЛИТЕРАТУРА

1. Конец аналогового мира: Индустрия 4.0, или что принесет с собой четвертая промышленная революция. URL: <https://theoryandpractice.ru/posts/14610-konets-analogovogo-mira-industriya-4-0-ili-cto-prineset-s-soboy-chetvertaya-promyshlennaya-revolyutsiya> (дата обращения: 02.01.2021).

2. Time for trust: How blockchain will transform business and the economy // Официальный отчет консалтинговой компании Pricewaterhouse Coopers. URL: <https://www.pwc.com/gx/en/industries/technology/publications/blockchain-report-transform-business-economy.html> (дата обращения: 02.01.2021).

3. «Сургутнефтегаз», РЖД и ОМК запустили пилотный проект на блокчейне // Ежегодный международный форум «ЦОД». URL: <https://dcforum.ru/news/«surgutneftegaz»-rzh-d-i-omk-zapustili-pilotnyi-proekt-na-blokcheine> (дата обращения: 02.01.2021).

4. Липницкий Д.В. Возможности и вызовы для блокчейн в новой индустриализации // *Экономика промышленности*. 2019. № 1 (85). С. 82–100.

5. Постановление Правительства РФ от 02.11.2020 № 1779 «О внесении изменений в Положение о системе мониторинга движения лекарственных препаратов для медицинского применения» // Справочно-правовая система «КонсультантПлюс» // URL: <http://www.consultant.ru/document/consdocLAW366581/> (дата обращения: 02.01.2020).

Для цитирования: Нестеров Я.А., Семенов Н.А. Применение технологии блокчейн в промышленности как части Индустрии 4.0 // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2021. № 2 (10). С. 93–98.

APPLICATION OF BLOCKCHAIN TECHNOLOGY IN INDUSTRY AS PART OF INDUSTRY 4.0

Ya.A. NESTEROV, Postgraduate, N.A. SEMENOV, Dr. Sc.

Tver State Technical University, 22, Af. Nikitin emb.,
170026, Tver, Russian Federation, e-mail: nesteroviyakov1@gmail.com

The article studies the ways of applying blockchain as a part of Industry 4.0. It considers various options of blockchain industrial usage, reviews the phenomenon of quasi-blockchain and words out the criteria of blockchain industrial application.

Keywords: blockchain, information technologies, quasi-blockchain, knowledge-based organizations, industrial production.

REFERENCES

1. The end of the analog world: Industry 4.0, or what the fourth industrial revolution will bring. URL: <https://theoryandpractice.ru/posts/14610-konets-analogovogo-mira-industriya-4-0-ili-chto-prineset-s-soboy-chetvertaya-promyshlennaya-revolyutsiya> (date accessed: 02.01.2021). (In Russian).

2. Time for trust: How blockchain will transform business and the economy. The official report of the consulting company Pricewaterhouse Coopers. URL: <https://www.pwc.com/gx/en/industries/technology/publications/blockchain-report-transform-business-economy.html> (date accessed: 02.01.2021).

3. Surgutneftegaz, railways and OMK has launched a pilot project on the blockchain. The annual international forum «DPC». URL: <http://dcforum.ru/news/surgutneftegaz-rzhd-i-omk-zapustili-pilotnyi-proekt-na-blokcheine> (date accessed: 02.01.2021). (In Russian).

4. Lipnitsky D.V. Opportunities and challenges for blockchain in the new industrialization. *Ekonomika promyshlennosti*. 2019. No 1 (85), pp. 82–100. (In Russian).

5. Decree of the government of the Russian Federation from 02.11.2020 No 1779 «On amendments to the regulations on the system of monitoring the movement of medicinal products for medical use». Legal reference system «Konsultant Plyus». URL: <http://www.consultant.ru/document/consdocLAW366581/> (date accessed: 02.01.2020). (In Russian).

Поступила в редакцию/received: 02.03.2021; после рецензирования/revised: 05.04.2021;
принята/accepted: 08.04.2021

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.

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 , π и т.п., и аббревиатуры должны быть расшифрованы при их первом написании в тексте.

Для набора формул следует использовать встроенный редактор. Формулы, внедренные 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
№ 2 (10), 2021**

Print ISSN 2658-5030

Редактор М.Б. Юдина
Корректор Ю.А. Якушева

Подписано в печать 16.06.2021

Дата выхода в свет

Формат 60 x 84/8

Физ. печ. л. 12,625

Тираж 500 экз.

Усл. печ. л. 11,741

Цена свободная

Заказ № 223

Бумага писчая

Уч.-изд. л. 10,984

С – 101

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