

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
№ 3 (27), 2025**

Online ISSN 2687-0029

Тверь 2025

Учредитель: ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет»

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

Заместители главного редактора:

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

Яблонев А.Л., д.т.н., профессор 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»

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

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

Мигранов М.Ш., д.т.н., профессор МГТУ «СТАНКИН»

Сдобняков Н.Ю., д.ф.-м.н., доцент ТвГТУ

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

Хопин П.Н., д.т.н., профессор МАИ

По направлению «Недропользование и горные науки»

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

Валиев Н.Г., д.т.н., профессор УГГУ

Горлов И.В., д.т.н., доцент ТвГТУ

Керопян А.М., д.т.н., доцент, главный научный сотрудник ООО «МНИПИИТИ»

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

Мисников О.С., д.т.н., доцент ТвГТУ

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

По направлению «Информационные технологии и телекоммуникации»

Бурдо Г.Б., д.т.н., профессор ТвГТУ

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

Дзюба С.М., д.ф.-м.н., профессор ТвГТУ

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 разделам «Машиностроение», «Недропользование и горные науки», «Информационные технологии и телекоммуникации». Журнал выходит четыре раза в год.

Зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций. Регистрационный номер: ЭЛ № ФС77-74961 от 25 января 2019 г. Индексируется в базе данных Российского индекса научного цитирования (РИНЦ).

Входит в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук, по научным специальностям:

2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации;

2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами;

2.5.3. Трение и износ в машинах;

2.8.8. Геотехнология, горные машины.

СОДЕРЖАНИЕ

МАШИНОСТРОЕНИЕ

<i>Болотов А.Н., Новиков В.В., Новикова О.О.</i> Оценка вероятности возникновения электрохимической коррозии при формировании микроплазменных оксидных покрытий.....	5
<i>Измайлов В.В., Новоселова М.В., Сахаров К.А.</i> Влияние режимов лазерной обработки на триботехнические характеристики поверхности быстрорежущей стали.....	16
<i>Болотов А.Н., Новиков В.В., Новикова О.О.</i> Прецизионная алмазно-абразивная обработка керамических материалов.....	23
<i>Новоселова М.В., Афанасьева Л.Е.</i> Абразивная износостойкость хромоникелевого наплавленного покрытия.....	34
<i>Измайлов В.В., Новоселова М.В., Афанасьева Л.Е.</i> Оптимизация энергетического режима лазерной резки биметаллического материала по критерию минимума шероховатости.....	42

НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ И ГОРНЫЕ НАУКИ

<i>Яблонев А.Л.</i> О выборе продольной базы прицепной торфяной профилирующей машины	49
<i>Шахматов К.Л., Орлов Т.В., Пухова О.В., Архипова М.В., Бондарь В.В.</i> Методология инвентаризации торфяного фонда Российской Федерации для реализации геотехнологий и целей национального кадастра парниковых газов.....	59
<i>Фам К.Х., Динь Х.Т., Фам В.Т., Кухарь М.Ю.</i> Создание и оценка 3D-модели спирально-конической зубчатой передачи трансмиссии горной техники.....	70
<i>Данилов А.С., Кремчев Э.А.</i> Техногенное засоление почв на Крайнем Севере: обзор проблем и потенциальных решений.....	80
<i>Горлов И.В., Митусов П.Е.</i> Анализ эффективности агрегата для комплексной переработки горных пород, обладающих пластическими свойствами.....	93

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ

<i>Бесхмельнов М.И., Лебедев Б.К., Лебедев О.Б.</i> Моделирование построения траектории подвижного объекта на основе методов многокритериальной оптимизации.....	103
--	-----

CONTENTS

MECHANICAL ENGINEERING

<i>Bolotov A.N., Novikov V.V., Novikova O.O.</i> Assessment of the probability of electrochemical corrosion during the formation of microplasma oxide coatings.....	5
<i>Izmailov V.V., Novoselova M.V., Sakharov K.A.</i> The effect of laser treatment conditions on tribotechnical characteristics of high-speed steel surface.....	16
<i>Bolotov A.N., Novikov V.V., Novikova O.O.</i> Precision diamond-abrasive processing of ceramic materials.....	23
<i>Novoselova M.V., Afanasieva L.E.</i> Abrasive wear resistance of chromium-nickel deposited coating.....	34
<i>Izmailov V.V., Novoselova M.V., Afanasieva L.E.</i> Optimization of the energy mode of laser cutting of bimetallic material by the criterion of minimum roughness.....	42

SUBSOIL USE AND MINING SCIENCES

<i>Yablonev A.L.</i> About the choice of the longitudinal base of a trailer-towed peat profiling machine.....	49
<i>Shakhmatov K.L., Orlov T.V., Pukhova O.V., Arkhipova M.V., Bondar V.V.</i> Methodology of inventory of the peatlands of the Russian Federation for the implementation of geotechnologies and objectives of the national greenhouse gas cadastre.....	59
<i>Pham Q.H., Dinh H.T., Pham V.T., Kukhar M.Yu.</i> Creating and evaluating of helical-bevel gear 3D model of mining machinery transmission.....	70
<i>Danilov A.S., Kremcheev E.A.</i> Technogenic soil salinization in the Far North: a review on challenges and potential solutions.....	80
<i>Gorlov I.V., Mitusov P.E.</i> Analysis of the efficiency of the unit for the complex processing of rocks with plastic properties.....	93

INFORMATION TECHNOLOGY AND TELECOMMUNICATIONS

<i>Beskhmelnov M.I., Lebedev B.K., Lebedev O.B.</i> Modeling the construction of a mobile objects trajectory based on multicriterial optimization methods.....	103
--	-----

МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 620.197

ОЦЕНКА ВЕРОЯТНОСТИ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ КОРРОЗИИ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ МИКРОПЛАЗМЕННЫХ ОКСИДНЫХ ПОКРЫТИЙ

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, 22, e-mail: vnvkv@yandex.ru

© Болотов А.Н., Новиков В.В., Новикова О.О., 2025

Модифицирование поверхностей деталей путем формирования оксидных покрытий микроплазменным методом применяется в промышленности для улучшения их трибомеханических, антикоррозионных свойств. Поскольку характер процесса оксидирования является многофакторным, вероятность повреждения детали за счет возникновения электрохимической коррозии значительна. В статье установлены критерии, свидетельствующие о возникновении коррозии на поверхности изделия на различных этапах процесса оксидирования. Показано, что в процессе нарушения сплошности покрытия изменяется проводимость оксидного слоя, что отражается на ходе формовочных кривых напряжения на обрабатываемой детали. Предложен критерий оценки вероятности коррозии при микроплазменном оксидировании. Возможность ранней фиксации начала разрушения покрытия под действием электрохимической коррозии без прохождения полного цикла модифицирования поверхности детали повысит экономическую эффективность микроплазменного оксидирования.

Ключевые слова: микроплазменное оксидирование, микродуговое оксидирование, электрохимическая коррозия, площадь повреждения, керамические покрытия.

DOI: 10.46573/2658-5030-2025-3-5-15

ВВЕДЕНИЕ

К перспективным методам инженерии поверхности ответственных деталей из вентильных металлов относится метод микроплазменного электролитического оксидирования, или микродугового оксидирования (МДО) [1–6]. Формируемые керамические защитные покрытия сочетают высокие трибомеханические, электроизоляционные, теплофизические и антикоррозионные свойства [5–9]. Область применения получаемых изделий чрезвычайно широка: машино- и приборостроение, авиакосмическая, транспортная, авиационная и нефтегазодобывающая промышленность, радиоэлектронная и медицинская отрасли [10–15].

Технология оксидирования в электролитной плазме в целом универсальна, этапы формирования покрытия различных типов схожи. Варьирование физико-химических свойств получаемых материалов добавлением дисперсных наполнителей или составом электролита не меняет электрохимическую суть процесса [1, 5, 6, 11]. Даже при соблюдении технологии оксидирования могут возникнуть коррозионные

повреждения поверхности обрабатываемой детали и локальные изменения ее геометрических размеров [16, 17]. Важно отметить, что установить наличие разрушения покрытия можно только при полном прекращении микродуговых разрядов и извлечении детали из гальванической ванны [18], а восстановить исходную форму бракованной детали практически невозможно. При этом процесс оксидирования энергоемок и может длиться до 4 ч [19]. Поэтому стабильность воспроизведения качественного МДО-покрытия во многом определяет рентабельность применяемой технологии.

В опубликованных результатах научных исследований микроплазменного электролитического оксидирования недостаточно внимания уделено анализу причин возникновения электрохимической коррозии непосредственно при формировании покрытия. При этом все же можно утверждать, что процесс коррозии определяют несколько факторов [18, 20–23]. В первую очередь это качество электролита, его состав, степень выработки. Сохранение высоких свойств электролита, тонкая очистка от примесей – сложная технологическая задача. Входящая в состав наиболее часто используемого при МДО силикатно-щелочного электролита NaOH разъедает подложку из оксида основного металла (например, алюминия) [24]. Ингибитор коррозии $\text{Na}_2\text{O}(\text{SiO}_2)$ предотвращает этот процесс, однако его количество необходимо постоянно восполнять, так как оксид кремния встраивается в состав формируемого покрытия.

Форма обрабатываемого изделия во многом определяет плотность, характер силовых линий, количество электричества, проходящего к поверхности детали, и, соответственно, скорость и равномерность формирования покрытия. Резкая неоднородность электрического поля может провоцировать возникновение существенных дуговых разрядов, вызывающих отслоение покрытия и коррозию металла-основы [16]. Параметры электрического режима обработки также влияют на стабильность воспроизведения МДО-покрытий.

Электрохимическую коррозию может спровоцировать материал металла-основы. Он может быть композиционным, с включением компонентов с различными диэлектрическими свойствами [25, 26].

Перечисленные причины нарушения сплошности покрытия в процессе его формирования могут быть нивелированы технологическими методами, но полностью избавиться от повреждения изделия нельзя. Таким образом, возникновение электрохимической коррозии в процессе микроплазменного электролитического оксидирования имеет многофакторный характер [1, 16]. Это подтверждается особенностями электролитического оксидирования. Микроплазменные разряды в процессе формирования покрытия возникают в случайных зонах и перемещаются по обрабатываемой детали, вызывая неравномерное распределение плотности тока по поверхности и провоцируя возникновение коррозии даже при соблюдении технологических режимов. Дополнительным отрицательным фактором является то, что наряду с разрушением модифицируемого слоя происходит разрушение основного материала на глубину до 1 мм с потерей формы детали без возможности восстановления.

Экономическую эффективность микроплазменного оксидирования повысит возможность ранней фиксации начала разрушения покрытия под действием электрохимической коррозии, без прохождения полного цикла модификации поверхности детали.

Цели исследования: установление факторов, которые способствуют возникновению электрохимической коррозии на поверхности детали, и выработка критерия оценки вероятности возникновения очагов локальной коррозии при МДО.

ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Экспериментальные образцы были изготовлены из алюминиевого сплава Д16 и имели форму пластин площадью 0,1 дм². Формирование покрытия происходило в гальванической ванне, оборудованной рубашкой охлаждения, компрессором и вытяжной системой. Блок питания, подключенный к промышленной сети переменного тока с напряжением синусоидальной формы, действующим значением 380 В и частотой 50 Гц, обеспечивал плотность тока 5 А/дм².

Электролит состоял из раствора щелочи NaOH и жидкого стекла Na₂O(SiO₂)_n в дистиллированной воде. Силикатный модуль *n*, характеризующий качество стекла и равный числу молей SiO₂, приходящихся на один моль оксида натрия, был равен трем. Температура электролита поддерживалась в пределах 15–20 °С. С учетом результатов предыдущих исследований концентрация щелочи была выбрана 2 г/л для получения более равномерного покрытия [19]. Концентрация жидкого стекла *v* варьировалась от 0 до 10 г/л. При превышении концентрации Na₂O(SiO₂)_n 10 г/л в формирующемся композиционном керамическом покрытии возрастает содержание оксида кремния, что существенно снижает физико-механические свойства упрочненного слоя [19].

Каждым составом электролита было покрыто 20 образцов. Продолжительность процесса оксидирования составляла до 2 ч. После электролитической обработки образцы промывали в проточной воде и сушили горячим воздухом. В процессе микроплазменного оксидирования фиксировались формовочные кривые напряжения на обрабатываемой детали.

Для провоцирования коррозионного разрушения в качестве детерминанты коррозии в электролит добавлялась соль NaCl в концентрации от 0,2 до 2 г/л с шагом 0,2 г/л. Данный реагент был выбран исходя из того, что химическая реакция с ионами хлора сплава алюминия приводит к образованию алюминиевых галогенидов. Это и становится причиной окисления и разрушения поверхности металла.

Площадь повреждения керамического слоя оценивалась согласно разработанной методике. Полученные образцы фотографировались с помощью камеры разрешением 12 Мп. Фото поверхности распознавалось программой Adobe Photoshop, и оценивалось общее количество пикселей в изображении (рис. 1).

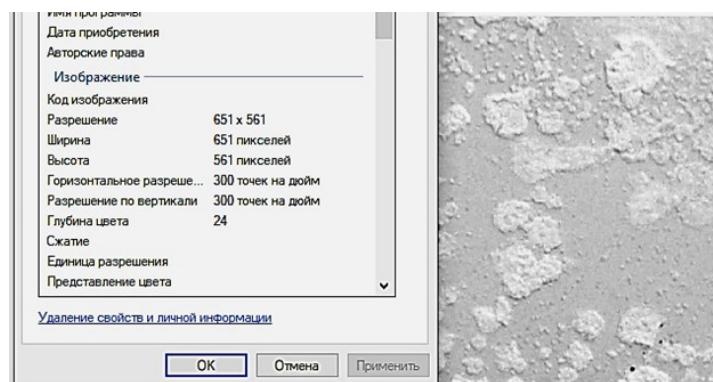


Рис. 1. Определение общей площади образца

Изображение контрастировалось, программно выделялись более светлые области, соответствующие локальному коррозионному повреждению, и рассчитывалось количество пикселей, отражающих корродированную площадь поверхности (рис. 2).

Относительная площадь повреждения μ оценивалась как

$$\mu = N_{\text{п}} / N_{\text{o}},$$

где $N_{\text{п}}$ – количество пикселей, соответствующее площади поврежденного керамического слоя, возникшей за установленное время на поверхности детали;

N_{o} – количество пикселей, соответствующее общей покрываемой площади детали.

Вероятность возникновения коррозии рассчитывалась по формуле

$$P = N_{\text{п}} / N_{\Sigma},$$

где $N_{\text{п}}$ – число поврежденных деталей;

N_{Σ} – общее число обрабатываемых деталей.

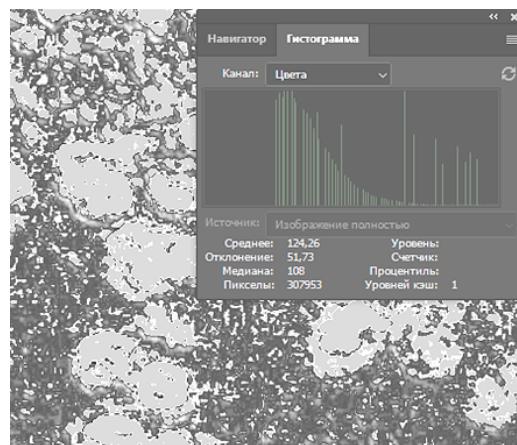


Рис. 2. Определение площади поврежденного покрытия

Определение результатов измерений и оценивание их погрешностей проводилось согласно ГОСТ 8.736-2011 на прямые измерения и рекомендациям на косвенные измерения МИ 2083-90. Относительная погрешность измерений не превышала 11 %.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Установление факторов, которые способствуют возникновению электрохимической коррозии

Установлена экстремальная зависимость относительной площади повреждения от концентрации жидкого стекла v в электролите (рис. 3). При концентрации $\text{Na}_2\text{O}(\text{SiO}_2)_n$ 5–7 г/л признаков электрохимической коррозии не наблюдается (рис. 4(а)). Снижение концентрации менее 4 г/л приводит к существенному ослаблению защитных свойств состава электролита и значительному разрушению поверхности детали (рис. 4(б)). С повышением концентрации $\text{Na}_2\text{O}(\text{SiO}_2)_n$ более 8 г/л вновь можно заметить рост относительной площади повреждения.

Результаты, представленные на рис. 3 и 4, получены по окончании полного времени обработки детали, которое составляло 30 мин. Начало процесса коррозионного разрушения при оксидировании не может быть установлено визуально. Темные пятна разрушений на участках поверхности, где отсутствует МДО, скрыты яркими вспышками искровых разрядов, хаотически перемещающимися по поверхности образца. К тому же практически прозрачный электролит достаточно быстро теряет

прозрачность за счет накопления продуктов гидролиза силиката и анодного растворения алюминия. Наблюдать наличие повреждений керамического покрытия под толстым слоем электролита невозможно. Для воспроизведения качественного МДО-покрытия необходимо прогнозировать появление участков электрохимической коррозии иным, косвенным методом.

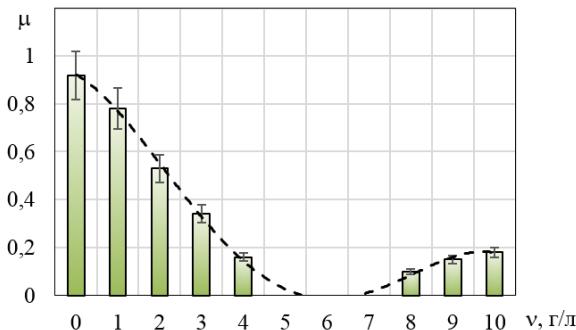


Рис. 3. Влияние жидкого стекла в электролите на относительную площадь коррозионного повреждения детали

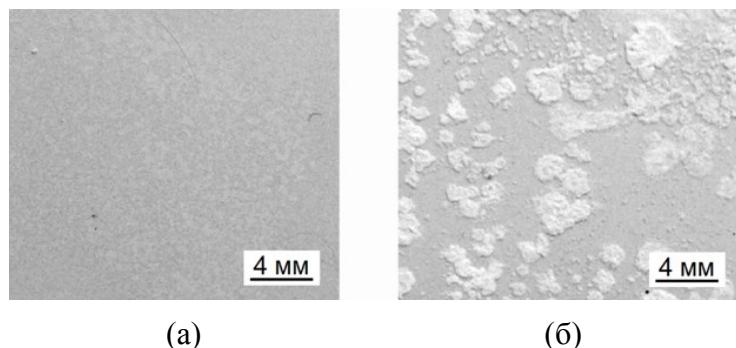


Рис. 4. Типичная поверхность детали с неповрежденным МДО-покрытием (а) и детали со следами электрохимической коррозии (б)

По результатам проведенных нами исследований коррозионное повреждение поверхности детали происходит на двух этапах МДО. В начале цикла оксидирования, в области анодирования [16], поверхность вентильного металла подвергается анодному растворению, пассивации и происходит рост оксидного слоя, обладающего диэлектрическими свойствами. При достижении оксидной пленкой определенной толщины возникающие искровые разряды способствуют электрохимическому окислению металла и разрыхлению искрами формирующегося покрытия. В случае создания химических элементов, препятствующих пассивации поверхности металла-основы и образованию оксидной пленки, образуются очаги электрохимической коррозии. При дальнейшем протекании процесса и возрастании модифицированного слоя искровой разряд переходит в микродуговой и далее в дуговой. Возникающие на этом этапе мощные дуговые разряды могут приводить к расплавлению основного материала, нарушению адгезии между керамическим слоем и основой и появлению локальных очагов разрушения МДО-покрытия. Механизм повреждения покрытия на данном этапе нельзя отнести к коррозионному типу, однако процесс имеет электролитическую природу, носит случайный характер и приводит к получению бракованного изделия.

Можно предположить, что поврежденный керамический слой обладает лучшей проводимостью и напряжение на обрабатываемой детали будет ниже, чем на детали без следов коррозии, при МДО в одинаковых составах электролита. Поэтому по изменению напряжения можно прогнозировать появление участков коррозионного разрушения непосредственно в процессе формирования покрытия.

Данное предположение было проверено построением формовочных кривых напряжения при оксидировании в электролитах с содержанием жидкого стекла 2, 6 и 10 г/л. Для электролита с содержанием жидкого стекла 2 г/л по окончании времени оксидирования более 50 % площади образца оказалось повреждено электрохимической коррозией (рис. 5). Рост напряжения в начале процесса и последующее его снижение можно объяснить одновременным образованием на оксидающей поверхности как участков с керамическим покрытием, так и участков с коррозией. Площадь поврежденных участков, увеличивающих проводимость и снижающих напряжение в процессе обработки, растет, поэтому напряжение, достигнув максимума (в данном случае это около 300 В), постепенно снижается.

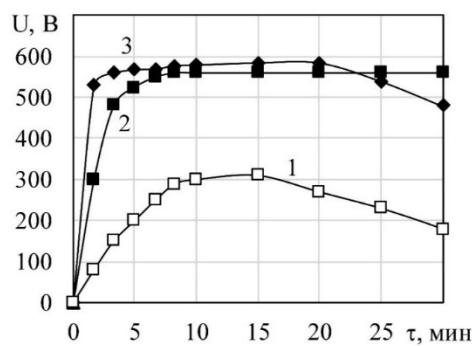


Рис. 5. Формовочные кривые напряжения на обрабатываемой детали в процессе оксидирования. Содержание жидкого стекла: 1 – 2 г/л; 2 – 6 г/л; 3 – 10 г/л

На участке анодирования и искрового разряда напряжение на образце при обработке в электролите с содержанием жидкого стекла 6 г/л возрастает практически линейно, на этапе МДО рост напряжения минимален (см. рис. 5). Стадия дугового разряда отсутствует. Скорость формирования покрытия выше, чем в предыдущем случае, поврежденные участки отсутствуют, образующийся композиционный керамический слой имеет одинаковую толщину по всей поверхности.

С увеличением концентрации жидкого стекла до 10 г/л наблюдается еще более быстрое линейное увеличение напряжения (см. рис. 5). Высокая концентрация жидкого стекла в электролите способствует быстрой пассивации металла-основы и интенсивному росту толщины оксидной пленки. На этапе микродугового разряда напряжение на обрабатываемой детали практически постоянно и затем постепенно снижается на стадии дугового разряда. При достижении определенной толщины покрытия в системе «электролит – оксидный слой – металлическая основа» начинают формироваться дуговые разряды, вызывающие локальные очаги разрушения покрытия площадью до 15–20 % от поверхности образца (светлые участки на рис. 6). При этом проводимость системы растет, напряжение уменьшается.



Рис. 6. Образец с локальными повреждениями на стадии дугового разряда

Выработка критерия оценки вероятности возникновения очагов локальной коррозии при микродуговом оксидировании

Для количественной оценки вероятности возникновения очагов электрохимической коррозии P предлагается исследовать корреляцию между P и параметром w – относительной скоростью изменения напряжения:

$$w = \left| \frac{dU}{dt} \right| / \left| \frac{dU_0}{dt} \right|,$$

где $\frac{dU}{dt}$ – скорость изменения напряжения на обрабатываемой детали в текущем процессе в заданный момент времени;

$\frac{dU_0}{dt}$ – скорость изменения напряжения при базовой технологии (базовом составе электролита) в аналогичный момент времени.

За базовую технологию (электролит) принят состав электролита, при котором относительная площадь повреждения μ минимальна, а вероятность получения бракованных деталей стремится к нулю.

Для исследования вероятности коррозии на участках анодирования и искрового разряда сравнивались формовочные кривые напряжения при микроплазменном оксидировании образцов в базовом электролите, содержащем щелочь NaOH концентрацией 2 г/л и жидкое стекло 6 г/л, и в аналогичном электролите, содержащем также соль NaCl в качестве детерминанты коррозии. Установлено, что при добавлении в электролит NaCl коррозия покрытия всегда наблюдалась через 5–7 мин после начала процесса оксидирования, напряжение на образце возрастало медленнее, чем при базовом процессе МДО.

Экспериментально полученные зависимости вероятности возникновения очагов электрохимической коррозии P и относительной скорости изменения напряжения на обрабатываемой детали w от концентрации NaCl в электролите k приведены на рис. 7.

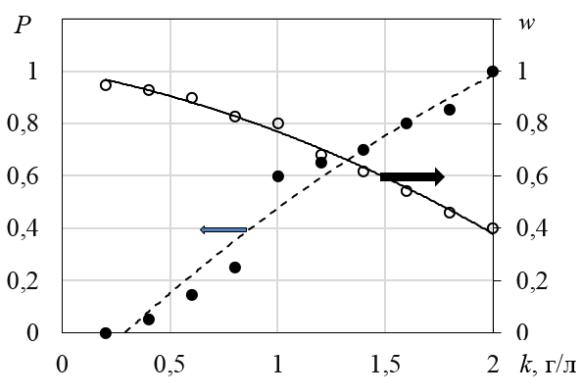


Рис. 7. Анализ вероятности возникновения очагов электрохимической коррозии на участках анодирования и искрового разряда МДО

Установлено, что при w менее 0,85 (что соответствует $\approx 20\%$ поврежденных деталей) резко повышается вероятность коррозии поверхности детали P , что делает продолжение МДО нецелесообразным.

При оценке вероятности возникновения повреждения композиционного керамического слоя P на стадии дугового разряда принималась во внимание относительная скорость изменения напряжения w в процессе МДО в электролитах с различным содержанием $\text{Na}_2\text{O}(\text{SiO}_2)_n$. Увеличение концентрации жидкого стекла в электролите вызывает быстрый рост толщины композиционного керамического покрытия и тем самым переход микродуговых разрядов в дуговые. За базовый режим принят процесс, проходящий в электролите, содержащем щелочь NaOH концентрацией 2 г/л и жидкое стекло в количестве 6 г/л ($\mu = 0$). В данном эксперименте плотность тока была увеличена до 10 A/dm^2 , а время микродугового оксидирования образца – до 2 ч. Относительная скорость изменения напряжения w фиксировалась в последние 10 мин второго часа. Результаты исследования приведены на рис. 8. Установлено, что при w выше 1,15 (что соответствует $\approx 20\%$ поврежденных деталей) значительно чаще происходит отслоение покрытия под действием плазменных дуговых разрядов и процесс формирования покрытия необходимо прерывать во избежание разрушения качественной детали.

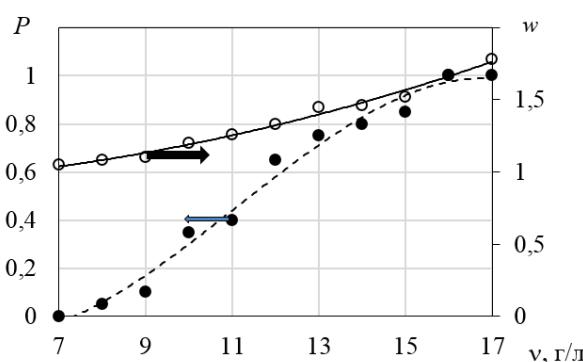


Рис. 8. Анализ вероятности возникновения очагов электрохимической коррозии на стадии дугового разряда МДО

Проведенные исследования показали, что параметр «относительная скорость изменения напряжения w » можно рассматривать как критерий оценки вероятности возникновения локальных очагов электрохимической коррозии при МДО.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Возникновение электрохимической коррозии в процессе микроплазменного оксидирования носит сложный, многофакторный характер, что обусловлено синергетическим сочетанием составляющих электролита в заданной точке электролитической ванны и распределением электрического поля по поверхности обрабатываемой детали.

Оценить вероятность возникновения электрохимической коррозии в процессе оксидирования можно по изменению напряжения на обрабатываемой детали без прохождения полного цикла обработки. Предложенный параметр «относительная скорость изменения напряжения w » может являться критерием начала коррозии в процессе оксидирования. Относительная скорость изменения напряжения рассчитывается как отношение скорости изменения напряжения на обрабатываемой детали в

текущем процессе к скорости изменения напряжения при базовой технологии, при которой вероятность получения корродированных покрытий стремится к нулю. За базовую технологию, или состав электролита, предлагается принимать такую, при которой относительная площадь повреждения μ минимальна.

Установлено, что на начальном этапе оксидирования при снижении w менее 0,85 резко повышается вероятность коррозионного повреждения поверхности детали, что делает дальнейшее модифицирование нецелесообразным. На заключительном этапе значение w не должно превышать 1,15 для предотвращения разрушения готового покрытия.

Результаты данного исследования могут быть использованы для оценки воспроизведения качественных покрытий по вероятности возникновения электрохимической коррозии непосредственно в процессе микроплазменного оксидирования. Учитывая существенную энергоемкость МДО, это будет способствовать повышению рентабельности технологического процесса.

ЛИТЕРАТУРА

1. Borisov A.M., Krit B.L., Lyudin V.B., Morozova N.V., Suminov I.V., Apelfeld A.V. Microarc oxidation in slurry electrolytes // *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2016. V. 52. P. 50–78.
2. Kaseem M., Fatimah S., Nashrah N., Ko Y.G. Recent progress in surface modification of metals coated by plasma electrolytic oxidation: Principle, structure, and performance // *Progress in Materials Science*. 2021. V. 117. P. 100735.
3. Arbuzova S.S., Butyagin P.I., Bol'shanin A.V., Kondratenko A.I., Vorob'ev A.V. Microarc Oxidation of Metal Surfaces: Coating Properties and Applications // *Russian Physics Journal*. 2020. V. 62. P. 2086–2091.
4. Fotovvati B., Namdari N., Dehghanhadikolaei A. On coating techniques for surface protection: A review // *Journal of Manufacturing and Materials Processing*. 2019. V. 3. P. 3010028.
5. Суминов И.В., Белкин П.Н., Эпельфельд А.В., Людин В.Б., Крит Б.Л., Борисов А.М. Плазменно-электролитическое модифицирование поверхности металлов и сплавов. М.: Техносфера, 2011. 512 с.
6. Новиков В.В., Новикова О.О., Болотов А.Н. Особенности структуры и применение материалов, сформированных в электролитной плазме // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2023. № 3 (19). С. 5–13.
7. Krishna L.R., Purnima A.S., Sundararajan G. A comparative study of tribological behavior of microarc oxidation and hard-anodized coatings // *Wear*. 2006. V. 261. P. 1095–1101.
8. Wang W., Xin C., Feng Z., Li G., Zhang R., Hu J., Tang M., Liu Y., Zhang W. Ceramic coatings by microarc oxidation of Ti and Al alloys // *Surfaces and Interfaces*. 2022. V. 33. P. 102260.
9. Zhou T., Zhang X., Liu J., Wang R., Shen B., Hu W., Liu, L. A new antibacterial Ca/P/Al containing coating // *Applied Surface Science*. 2020. V. 509. P. 144765.
10. Wei T., Yan F., Tian J. Characterization and wear- and corrosion-resistance of microarc oxidation ceramic coatings on aluminum alloy // *Journal of Alloys and Compounds*. 2005. V. 389. № 1–2. P. 169–176.

11. Болотов А.Н., Новиков В.В., Новикова О.О. Влияние дисперсных наполнителей на трикционные свойства керамических покрытий // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2024. № 1 (21). С. 26–36.
12. Jiang B.L., Yang W., Su Y. Engineering applications of microarc oxidation and magnetron sputtering // *Jinshu Rechuli/Heat Treatment of Metals*. 2008. V. 33. № 1. P. 86–90.
13. Витязь П.А., Басинюк В.Л., Белоцерковский М.А. Применение наноструктурных материалов и активированных методов инженерии поверхности для создания современных объектов техники // *Механика машин, механизмов и материалов*. 2012. № 3 (20)–4 (21). С. 46–66.
14. Штокал А.О., Рыков Е.В., Желтухин Р.В., Артемьев А.В., Добровестнов К.Б., Говорун Т.А., Шаталов В.К., Богачев В.А., Баженова О.П. Перспективы применения микродугового оксидирования при создании теплового экрана космического аппарата «Интергелиозонд» // *Идеи К.Э. Циолковского в контексте современного развития науки и техники: Материалы 53-х Научных чтений памяти К.Э. Циолковского*. Калуга: АКФ Политоп, 2018. С. 356–359.
15. Xu C., Chen L., Zheng C., Zhang H., Zhao C., Wang Z., Lu S., Zhang J., Zhang L. Improved Wear and Corrosion Resistance of Microarc Oxidation Coatings on Ti–6Al–4V Alloy with Ultrasonic Assistance for Potential Biomedical Applications // *Advanced Engineering Materials*. 2021. V. 23. № 4. P. 202001433.
16. Суминов И.В., Эпельфельд А.В., Людин В.Б., Крит Б.Л., Борисов А.М. Микродуговое оксидирование (теория, технология, оборудование). М.: Экомет, 2005. 368 с.
17. Wei T., Yan F., Tian J. Characterization and wear- and corrosion-resistance of microarc oxidation ceramic coatings on aluminum alloy // *Journal of Alloys and Compounds*. 2005. V. 389. P. 169–176.
18. Людин В.Б., Эпельфельд А.В., Крит Б.Л., Федичкин И.Д., Мелихов В.В., Чудинов Д.Б. Стабильность свойств защитных покрытий, формируемых методом микродугового оксидирования при групповой обработке // *Известия высших учебных заведений. Порошковая металлургия и функциональные покрытия*. 2018. № 1. С. 44–50.
19. 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.
20. Xue W., Hua M., Shi X., Tian H. Growth kinetics of microarc oxidation films on cast aluminum alloy and their corrosion resistance // *Kuei Suan Jen Hsueh Pao/Journal of the Chinese Ceramic Society*. 2007. V. 35. P. 731–735.
21. Kosari A., Zandbergen H., Tichelaar F., Visser P., Taheri P., Terryn H., Mol J. In-situ nanoscopic observations of dealloying-driven local corrosion from surface initiation to in-depth propagation // *Corrosion Science*. 2020. V. 177. P. 108912.
22. Shen Y., Wang H., Pan Y. Effect of current density on the microstructure and corrosion properties of MAO coatings on aluminum alloy shock absorber // *Key Engineering Materials*. 2018. V. 764. P. 28–38.
23. Трушкина Т.В., Михеев А.Е., Сиденко Н.А., Раводина Д.В., Гирн А.В. Влияние технологических режимов микродугового оксидирования на пористость и коррозионную стойкость сплава системы Al-Mg-Sc // *Вестник Сибирского*

государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева. 2016. № 17 (4). С. 1072–1076.

24. Boinet M., Bernard J., Chatenet M., Dalard F., Maximovitch S. Understanding aluminum behaviour in aqueous alkaline solution using coupled techniques. Part II: Acoustic emission study // *Electrochimica Acta*. 2010. V. 55. P. 3454–3463.

25. 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.

26. 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.

Для цитирования: Болотов А.Н., Новиков В.В., Новикова О.О. Оценка вероятности возникновения электрохимической коррозии при формировании микроплазменных оксидных покрытий // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2025. № 3 (27). С. 5–15.

ASSESSMENT OF THE PROBABILITY OF ELECTROCHEMICAL CORROSION DURING THE FORMATION OF MICROPLASMA OXIDE COATINGS

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

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

Modification of parts surfaces by forming oxide coatings using the microplasma method is used in industry to improve their tribomechanical and anticorrosive properties. Since the nature of the oxidation process is multifactorial, the probability of damage to the part due to the occurrence of electrochemical corrosion is significant. The article establishes criteria indicating the occurrence of corrosion on the surface of the product at various stages of the oxidation process. It is shown that in the process of violation of the continuity of the coating, the conductivity of the oxide layer changes, which is reflected in the course of the forming voltage curves on the workpiece. A criterion for assessing the probability of corrosion during microplasma oxidation is proposed. The possibility of early detection of the onset of coating destruction under the action of electrochemical corrosion without going through a full cycle of modifying the surface of the part will increase the economic efficiency of microplasma oxidation.

Keywords: microplasma oxidation, microarc oxidation, electrochemical corrosion, damage area, ceramic coatings.

Поступила в редакцию/received: 13.02.2025; после рецензирования/revised: 12.03.2025;
принята/accepted: 19.03.2025

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ НА ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОВЕРХНОСТИ БЫСТРОРЕЖУЩЕЙ СТАЛИ

В.В. ИЗМАЙЛОВ, д-р техн. наук, М.В. НОВОСЕЛОВА, канд. техн. наук,
К.А. САХАРОВ, асп.

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

© Измайлов В.В., Новоселова М.В., Сахаров К.А., 2025

Описаны результаты экспериментальных исследований триботехнических характеристик (твердости, коэффициента трения, интенсивности изнашивания) быстрорежущей стали после лазерной поверхностной обработки. Проведен анализ влияния энергетического параметра лазерной обработки (энергии лазерного излучения в расчете на единицу площади обрабатываемой поверхности) на триботехнические характеристики поверхности быстрорежущей стали.

Ключевые слова: лазерная обработка, быстрорежущая сталь, твердость, коэффициент трения, интенсивность изнашивания.

DOI: 10.46573/2658-5030-2025-3-16-22

ВВЕДЕНИЕ

Поверхностное упрочнение деталей лазерным лучом широко применяется с целью повышения их эксплуатационных свойств, в том числе триботехнических [1–6]. От других известных технологий модификации поверхностей лазерная обработка выгодно отличается производительностью, технологичностью, экономичностью, высокой степенью автоматизации, локальным характером воздействия. Однако реализовать все преимущества лазерной технологии в максимальной степени можно только при использовании оптимальных режимов обработки, к основным из которых относятся мощность лазерного излучения и скорость перемещения лазерного луча.

За счет изменения параметров лазерного излучения удается в широких пределах регулировать скорости нагрева и охлаждения металла, а также время облучения, благодаря чему становится возможным получить требуемые структуры и свойства сплавов в зоне лазерного воздействия [7]. Один из таких параметров – плотность мощности излучения $q_w = \frac{4W}{\pi d_n^2}$, где W – мощность излучения лазера непрерывного действия; d_n – диаметр лазерного пятна на поверхности образца. В данном выражении предполагается, что энергия излучения равномерно распределена по сечению лазерного пучка. При термоупрочнении величина плотности мощности излучения q_w для большинства металлов и сплавов лежит в диапазоне 10...100 кВт/см² [8].

Близким по смыслу энергетическим параметром лазерной обработки материалов является параметр q , характеризующий энергию лазерного излучения, приходящуюся на единицу площади обрабатываемой поверхности:

$$q = \frac{W}{vd_n},$$

где v – скорость перемещения лазерного луча.

В работе проанализировано влияние данного энергетического параметра лазерной поверхностной обработки стальных образцов на их триботехнические характеристики (твердость, коэффициент трения, интенсивность изнашивания) и определен характер этого влияния.

ОБРАЗЦЫ И МЕТОДИКА ИСПЫТАНИЙ

Лазерной обработке подвергались образцы из быстрорежущей стали Р6М5, которые предварительно прошли закалку и трехкратный отпуск. Режимы лазерной обработки отличались мощностью излучения и скоростью перемещения луча. Поверхность образцов подвергалась упрочнению на трех режимах:

- 1) $W = 2,4 \text{ кВт}$, $v = 25 \text{ мм/с}$;
- 2) $W = 2,0 \text{ кВт}$, $v = 15 \text{ мм/с}$;
- 3) $W = 2,4 \text{ кВт}$, $v = 15 \text{ мм/с}$.

Диаметр лазерного пятна d_n на поверхности обрабатываемых образцов составлял 6 мм. Такие режимы соответствуют изменению параметра q в интервале $16 \dots 27 \text{ Дж/мм}^2$. Величина параметра q_w составляла $7 \dots 8,5 \text{ кВт/см}^2$.

Одним из важных триботехнических параметров материала является его твердость. От нее зависят, в частности, контактная жесткость, износостойкость и другие эксплуатационные характеристики контакта деталей машин. На практике в основном используют три метода измерения твердости: по Бринеллю, Виккерсу и Роквеллу. Их объединяет общий принцип – индентирование исследуемого материала твердым наконечником правильной геометрической формы, а различаются они представлением результата. К сожалению, все эти характеристики не имеют явного физического смысла, а последняя вообще выражается в условных единицах. Явный физический смысл имеет только так называемая твердость индентирования H_{IT} (ГОСТ Р 8.748-2011 (ИСО 14577-1:2002)), известная также как твердость по Мейеру: она равна среднему нормальному напряжению (контактному давлению) в контакте индентора с отпечатком в материале образца. Поскольку с трибологической точки зрения интерес представляет именно эта величина, для характеристики твердости упрочненной лазерным излучением поверхности использовали величину H_{IT} , которую определяли вдавливанием в поверхность материала алмазных инденторов в виде четырехгранной пирамиды (Виккерса) или конуса с закругленной вершиной (Роквелла). Числовое значение твердости H_{IT} оценивали по нормальной нагрузке N на индентор и площади проекции отпечатка A_p на номинальную поверхность образца:

$$H_{IT} = \frac{N}{A_p}.$$

Твердость индентирования на микромасштабном уровне (микротвердость) измеряли на приборе ПМТ-3 при нагрузке на пирамидальный индентор 1,5 и 2 Н. На макромасштабном уровне твердость (макротвердость) измеряли на специально изготовленном твердомере при нагрузке на конический индентор Роквелла 180 и 270 Н.

Коэффициент трения – один из основных триботехнических параметров фрикционного контакта. Измерение коэффициента трения исследуемых образцов проводили на микротрибометре [9] по схеме «шар – плоскость». Плоский образец из исследуемого материала контактировал со сферическим контролобразцом из конструкционной подшипниковой стали ШХ15 диаметром 1 мм. Нагрузка на контакт варьировалась в диапазоне 1…5 мН.

Интенсивность изнашивания также относится к основным триботехническим параметрам материала фрикционной пары. Для экспресс-оценки износостойкости материала часто проводят испытания в режиме изнашивания о закрепленный абразив [10–12]. В нашем случае стальные образцы испытывались на изнашивание о закрепленный абразив по схеме «шар – плоскость». В качестве контролобразца использовали сферический наконечник с алмазным напылением. Диаметр наконечника равен 1 мм. К контакту прикладывали нагрузку в 0,5 Н. Тангенциальные возвратно-поступательные перемещения контролобразца осуществлялись электромеханическим приводом с питанием от генератора импульсов с частотой 20 Гц. После испытаний записывали профилограммы поверхности образцов перпендикулярно канавке изнашивания (рис. 1), по которым определяли глубину последней.

Затем рассчитывали линейную интенсивность изнашивания I_h и износостойкость I материала – величину, обратную I_h (ГОСТ 27674-88).

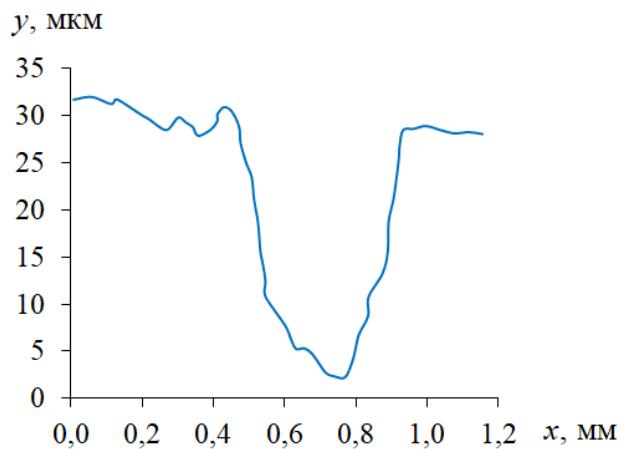


Рис. 1. Типичный пример профилограммы канавки изнашивания

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В соответствии с целью работы полученные в экспериментах триботехнические характеристики стальной поверхности после лазерной обработки рассматривались в связи с параметром q .

Значения твердости исследованных стальных поверхностей после лазерной обработки в зависимости от нагрузки на индентор представлены на рис. 2. При измерении микротвердости глубина отпечатка составляла 2…3 мкм. Видно, что тонкий поверхностный слой материала толщиной $h \approx 3$ мкм существенно упрочнен, при $h \geq 3$ мкм твердость практически постоянна вплоть до нескольких десятков микрометров от поверхности. В наших экспериментах величина линейного износа на порядок превышает глубину внедрения индентора при измерении микротвердости.

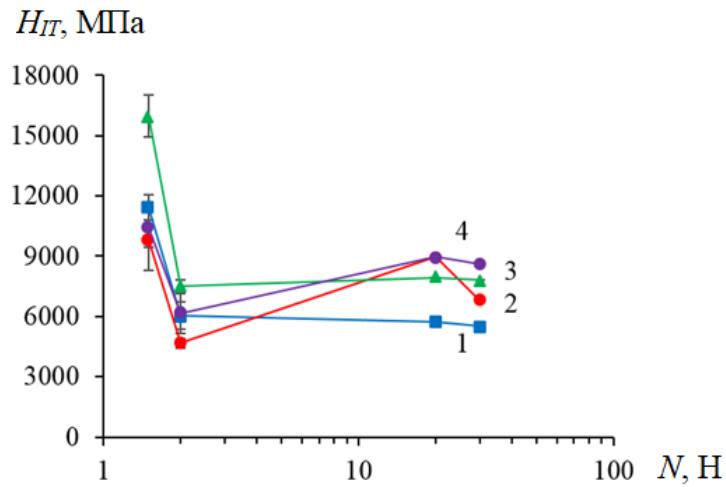


Рис. 2. Зависимость твердости стальных образцов от нагрузки на индентор:

- 1 – без лазерной обработки;
- 2 – $q = 16 \text{ Дж/мм}^2$;
- 3 – $q = 22 \text{ Дж/мм}^2$;
- 4 – $q = 27 \text{ Дж/мм}^2$

Однозначного влияния параметра q на микротвердость не выявлено (рис. 3(а)).

Что касается макротвердости поверхности после лазерной обработки, то можно отметить явное увеличение этой характеристики с увеличением энергетического параметра q – до полутора раз в исследованном диапазоне величин q (рис. 3(б)).

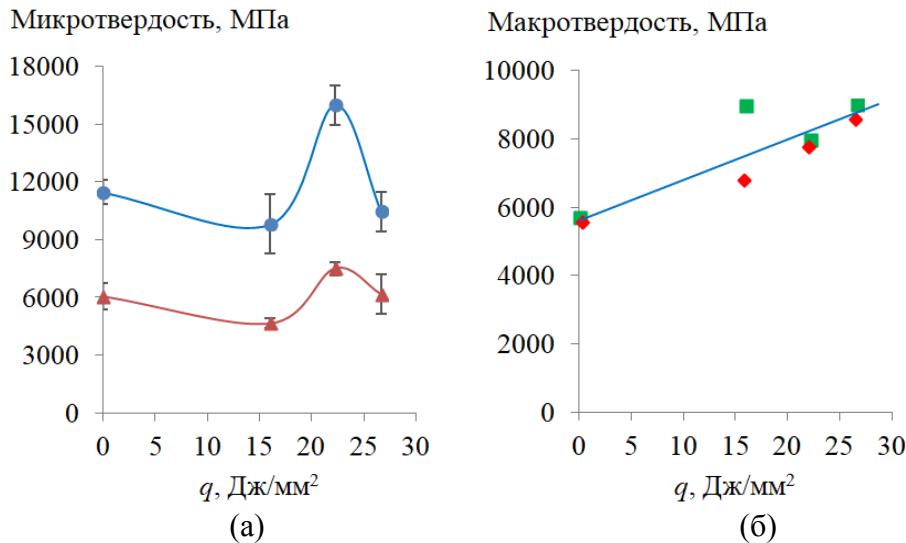


Рис. 3. Микро- (а) и макро- (б) твердость стальных образцов в зависимости от энергетического параметра лазерной обработки q :

- – $N = 1,5 \text{ N}$;
- ▲ – $N = 2 \text{ N}$;
- – $N = 180 \text{ N}$;
- ◆ – $N = 270 \text{ N}$

Результаты измерений коэффициента трения f по описанной выше методике в двух направлениях – параллельно и перпендикулярно движению лазерного луча по поверхности образца – представлены на рис. 4 с доверительным интервалом при доверительной вероятности $\alpha = 0,95$.

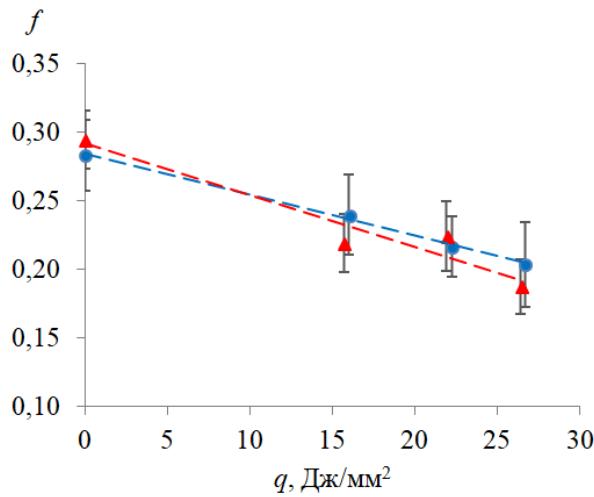


Рис. 4. Коэффициент трения
в зависимости от параметра лазерной обработки q

Наблюдается отчетливо выраженная убывающая зависимость коэффициента трения от параметра q , характер которой практически линейный с высокой степенью корреляции (коэффициент корреляции 0,99).

Характеристики изнашивания, полученные при испытании на абразивную износостойкость поверхностей после лазерной обработки, приведены на рис. 5. Экспериментальные значения коэффициента изнашивания K [13] исследуемых образцов сравнимы по порядку величины с известными значениями для упрочненных инструментальных сталей [13] и примерно на порядок меньше соответствующих значений для абразивного изнашивания сталей о закрепленный абразив [14].

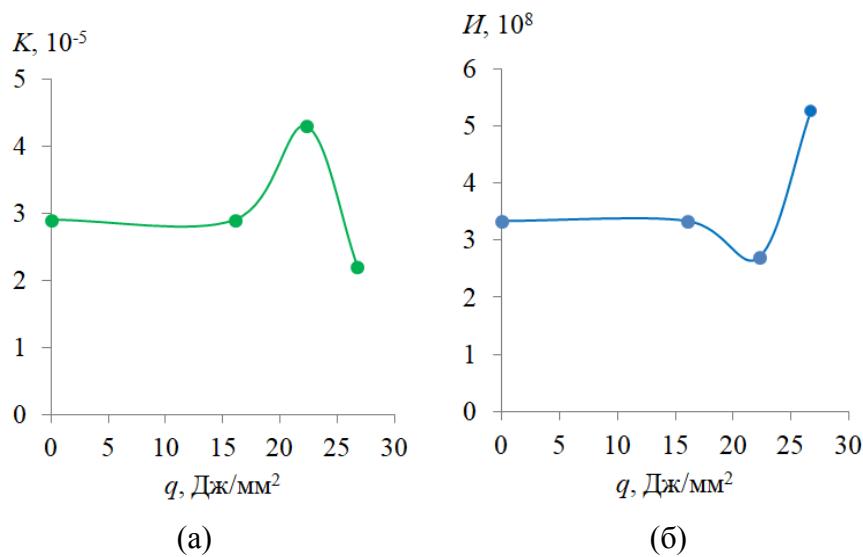


Рис. 5. Характеристики изнашивания стальных поверхностей,
обработанных лазерным излучением с различным значением параметра q :
коэффициент изнашивания (а); износостойкость (б)

Однозначного влияния параметра q на абразивную износостойкость обработанной поверхности не выявлено: лазерная обработка может как повысить, так и понизить износостойкость по сравнению с необработанной поверхностью. Тем не

менее результаты испытаний, представленные на рис. 5, свидетельствуют о возможности существенного повышения износостойкости быстрорежущей стали при оптимальных режимах лазерной обработки поверхности. Окончательное обоснование и конкретные характеристики таких оптимальных режимов станут предметом дальнейшего исследования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты экспериментов показали, что энергетический параметр q , который характеризует энергию лазерного излучения, приходящуюся на единицу площади обрабатываемой поверхности, влияет на макротвердость поверхностного слоя обрабатываемой быстрорежущей стали, повышая ее до 1,5 раз в исследованном диапазоне мощности и скорости перемещения луча. Выявлено и влияние данного параметра на коэффициент трения плоской заготовки из быстрорежущей стали в паре со сферическим индентором из высокоуглеродистой стали. В исследованном диапазоне режимов лазерного излучения зафиксировано снижение коэффициента трения (также практически в 1,5 раза) с ростом величины параметра q . Менее однозначное влияние в описанных экспериментах данный параметр оказал на интенсивность изнашивания. Однако при определенных величинах параметра q эксперименты также показали возможность существенного повышения износостойкости быстрорежущей стали. Необходимо проведение дополнительных исследований для уточнения характера влияния параметра q на интенсивность изнашивания обработанной поверхности и обоснования диапазона оптимальных значений данного параметра.

ЛИТЕРАТУРА

1. Степанкин И.Н., Поздняков Е.П., Пешкун Ю.Н., Девойно О.Г., Калиниченко А.С. К вопросу влияния режимов термической и лазерной обработки на структуру и свойства быстрорежущей стали Р6М5 // *Инновационные решения проблем экономики знаний Беларуси и Казахстана: Материалы научно-практической конференции*. Минск: Белорусский национальный технический университет, 2016. С. 105–107.
2. Бирюков В.П. Анализ влияния режимов лазерного упрочнения на механические и триботехнические свойства поверхностей трения сталей // *Журнал передовых исследований в области естествознания*. 2022. № 17. С. 8–12.
3. Сидашов А.В., Козаков А.Т., Яресько С.И., Каковкина Н.Г., Мантуров Д.С. Фазовый состав и трибологические характеристики поверхностных слоев углеродистых инструментальных сталей после лазерной обработки на воздухе // *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*. 2021. № 4. С. 47–58.
4. Юдина А.В., Гаврилов Г.Н. Анализ изменения микротвердости быстрорежущих сталей после лазерной обработки // *European Student Scientific Journal*. 2014. № 1. URL: <https://sjes.esrae.ru/ru/article/view?id=199> (дата обращения: 22.02.2025).
5. Гаврилов Д.И., Жданов А.В., Беляев И.В. Влияние лазерной модификации поверхности на физико-механические и трибологические свойства штамповой стали // *Ползуновский вестник*. 2022. Т. 2. № 4. С. 14–18.
6. Токарев Д.И., Дроздов А.А., Морозов Е.А., Абляз Т.Р., Иванова Ю.С., Полежаев И.С. Влияние лазерного воздействия на состояние закаленной быстрорежущей стали Р6М5 // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение*. 2019. Т. 21. № 4. С. 34–41.
7. Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Мисюров А.И. Технологические процессы лазерной обработки: учебное пособие. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. 663 с.

8. Металловедение и термическая обработка стали и чугуна: справочник: в 3 т. / под ред. А.Г. Рахштадта, Л.М. Капуткиной, С.Д. Прокошкина. М.: Интермет Инжиниринг, 2005. Т. 1. 647 с.

9. Патент РФ 2150688. *Способ определения коэффициента трения покоя поверхностных слоев материала* / В.В. Измайлов, А.Ф. Гусев, И.Н. Нестерова, А.А. Иванова. Заявл. 25.12.1998. Опубл. 10.06.2000, Бюл. № 16.

10. Сизова О.В. Структурные изменения и физико-механические свойства инструментальных сталей и твердых покрытий при термическом воздействии и трении: дис. ... докт. техн. наук. Томск, 1998. 324 с.

11. Филиппов М.А., Буров С.В., Легчило В.В., Фивейский А.М., Антонов С.В., Мухаметярова Е.Н. Оценка износостойкости при абразивном изнашивании сталей со структурой метастабильного аустенита // *Инновации в материаловедении и металлургии: Материалы I Международной интерактивной научно-практической конференции*. 2012. Екатеринбург: Уральский ун-т, 2012. Ч. 1. С. 21–29.

12. Степанкин И.Н., Верещагина Л.С., Поздняков Е.П., Девойно О.Г., Веремей П.В. Влияние лазерной модификации на эксплуатационные характеристики стали Р6М5 // *Вестник Гомельского государственного технического университета им. П.О. Сухого*. 2015. № 1 (60). С. 19–26.

13. Мышкин Н.К., Петроковец М.И. Трение, смазка, износ. М.: Физматлит, 2007. 368 с.

14. Попов В.Л. Механика контактного взаимодействия и физика трения. От нанотриологии до динамики землетрясений. М.: Физматлит, 2013. 352 с.

Для цитирования: Измайлов В.В., Новоселова М.В., Сахаров К.А. Влияние режимов лазерной обработки на триботехнические характеристики поверхности быстрорежущей стали // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2025. № 3 (27). С. 16–22.

THE EFFECT OF LASER TREATMENT CONDITIONS ON TRIBOTECHNICAL CHARACTERISTICS OF HIGH-SPEED STEEL SURFACE

V.V. IZMAILOV, Dr. Sc., M.V. NOVOSELOVA, Cand. Sc.
K.A. SAKHAROV, Postgraduate

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

The article describes the results of experimental studies of the tribological characteristics (hardness, friction coefficient, wear intensity) of high-speed steel after laser surface treatment. The analysis of the influence of the energy parameter of laser treatment (laser radiation energy per unit area of the treated surface) on the tribological characteristics of the high-speed steel surface is carried out.

Keywords: laser treatment, high-speed steel, hardness, friction coefficient, wear intensity.

Поступила в редакцию/received: 21.02.2025; после рецензирования/revised: 12.03.2025;
принята/accepted: 19.03.2025

ПРЕЦИЗИОННАЯ АЛМАЗНО-АБРАЗИВНАЯ ОБРАБОТКА КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

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, 22, e-mail: vnvkv@yandex.ru

© Болотов А.Н., Новиков В.В., Новикова О.О., 2025

В работе исследовано влияние нагрузочно-скоростных режимов изнашивания, структурного состава керамического алмазного материала на производительность шлифования и расход абразивного инструмента. Установлено, что определяющими факторами являются нагрузка на инструмент, его зернистость и концентрация алмазов, физико-механические свойства взаимодействующих материалов, глубина подачи. Получены зависимости параметров абразивного изнашивания от вида шлифования. Даны практические рекомендации по выбору диапазонов зернистости, концентрации алмазов, глубины шлифования, скорости обработки. Оценены марки алмазов.

Ключевые слова: прецизионная обработка, производительность шлифования, расход алмазов, режимы шлифования, алмазно-абразивная обработка, керамическая связка.

DOI: 10.46573/2658-5030-2025-3-23-34

ВВЕДЕНИЕ

Алмазные абразивные инструменты востребованы при высокоэффективной и прецизионной обработке твердых и хрупких материалов, таких как техническая керамика, стекло, минералы [1–4]. При тенденции современного производства к повышению эффективности и внедрению нанотехнологий остро встает вопрос повышения качества изготовления деталей: обеспечения заданных геометрических размеров, микро- и наношероховатости поверхности изделия при сокращении времени обработки [5, 6]. При производстве абразивных инструментов в данных условиях важно определить направления улучшения структуры материала. Это является сложной технической задачей, так как алмазосодержащие инструменты представляют собой сложную структуру, синергетически объединяющую свойства матрицы, дисперсных алмазов и возможных наполнителей. Кроме того, необходимо выявить динамические факторы, определяющие режущую способность и стойкость инструмента [2, 7–9].

В современных исследованиях значительное внимание уделено факторам, определяющим работоспособность высокоресурсного алмазно-абразивного инструмента для сверхточного шлифования [2–7, 10, 11]. В работе [3] представлены экспериментальные и модельные результаты испытаний гальванических кругов с алмазным зерном при шлифовке керамических материалов состава Al_2O_3 . Показано, что на скорость съема материала и получаемую шероховатость поверхности влияют размер зерна алмаза и толщина никелевой связки. Отмечено, что нагрузка при шлифовании является важнейшим фактором, определяющим производительность процесса удаления материала, качество поверхности и срок службы инструмента [10]. Значимость параметров алмазно-абразивного шлифования (материала заготовки,

формы абразива, температуры и глубины подачи) рассмотрена в работе [5] на микроуровне. В фундаментальных работах [12, 13] приведены результаты экспериментальных исследований и построен ряд феноменологических моделей для алмазных материалов с низкомодульными органическими и металлическими матрицами при обработке на конкретном оборудовании. Показано, что многие характеристики изнашивания инструмента и детали имеют неоднозначные тенденции изменения в зависимости от экспериментального оборудования и жесткости системы.

Однако в большинстве исследований рассмотрены инструментальные алмазно-абразивные материалы с мягкими связками. Оценке работоспособности алмазных инструментов с твердыми керамическими матрицами посвящено значительно меньше работ [7, 9], что обусловлено сложностями технологии встраивания дисперсных частиц алмаза в тугоплавкую керамическую матрицу. Результатов исследований абразивного фрикционного взаимодействия алмазосодержащих материалов с керамическими матрицами и твердых керамических деталей недостаточно для разработки высокоеффективных инструментов и выбора режимов обработки.

Авторами разработан алмазосодержащий материал с керамической матрицей из оксида Al_2O_3 , который показал высокие режущие свойства и хорошее алмазоудержание [15–17]. Инструмент из такого материала показал производительность шлифования в 2–5 раз выше, чем у инструментов с традиционными связками, и способность эффективно изнашивать деталь в течение длительного времени без необходимости в правке режущей поверхности. Установлено, что взаимодействие алмазосодержащего керамического материала (АКМ) и керамической обрабатываемой поверхности в режиме устойчивой эксплуатации абразивного инструмента носит упругий характер.

Для дальнейшего развития исследований в этом направлении необходимо экспериментально и теоретически проанализировать влияние структурных и динамических параметров алмазно-абразивной обработки на изнашивание фрикционной системы «алмазосодержащий инструмент с керамической матрицей – керамическая деталь», ранжировать степень влияния этих параметров. Построение инженерной модели влияния параметров абразивной обработки позволит определить рациональные технологические решения, направленные на повышение эффективности прецизионной обработки твердых керамических материалов.

Цель работы – выявить факторы, наиболее существенно влияющие на работоспособность АКМ, и определить их рациональные значения.

ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Абразивные инструменты изготавливались в виде дисков толщиной 0,6 см с диаметрами: наружным – 5 см, внутренним – 2 см. Для изготовления образцов абразивных инструментов использовались синтетические алмазы марки АС6 зернистостью d 100/80 и 63/50. Материалом связки для основных испытуемых материалов была керамическая матрица, состоящая из оксидов алюминия.

Для сопоставления получаемых результатов были изготовлены абразивные алмазные инструменты с традиционно применяемыми металлической (М1) и органической бакелитовой (Б1) связками. Исследовались режимы шлифования электротехнической керамики $BaO \cdot SiO_2 \cdot Al_2O_3$ твердостью 16 ГПа, обработка велась в присутствии смазочно-охлаждающей жидкости (техническая вода) при линейной скорости скольжения 30 м/с.

Абразивные инструменты из алмазосодержащей керамики изготавливались путем прессования алюминиевого порошка и дисперсных алмазов в вакууме с последующим спеканием при температуре 570...575 °С в течение 30...40 мин [16]. Для защиты от чрезмерной неконтролируемой графитизации в процессе формирования материала зерна алмаза предварительно подвергались меднению. Непосредственно режущий абразивный слой формировался электролитическим оксидированием на поверхности дисковой заготовки (рис. 1). Под действием микродуговых разрядов алюминиевая связка преобразовывалась в матрицу из оксидов алюминия α -, β - и γ -модификаций, в которой равномерно по объему распределялись жестко фиксированные дисперсные алмазы. Образцы с дисперсностью алмаза 63/50 были изготовлены с объемной плотностью зерен $\tau = 37,5; 25; 18,75$ и $12,5\%$, что соответствует 150, 100, 75 и 50 % концентрации алмаза К (за 100%-ю концентрацию алмаза в материале принимают содержание алмазного порошка в количестве 4,39 карата в 1 cm^3) [7].



Рис. 1. Процесс электролитического формирования алмазного керамического покрытия

Фрикционные испытания проводились на машине трения МТ-2 [16]. Для оценки параметров микроповерхности трения применялись стандартные методы профилометрии ГОСТ 19300-86 [18], анализ микроструктуры выполнялся с использованием металлографического микроскопа. Микропрочность оценивали с помощью микротвердомера ПМТ-3, в качестве индентора выступала пирамида Виккерса.

АНАЛИТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ РАСЧЕТА

При аналитическом выявлении факторов, влияющих на работоспособность алмазосодержащих керамических материалов, а также при расчете фрикционных параметров в зависимости от давления, концентрации и зернистости алмазов, микроповерхности инструмента и обрабатываемой детали будем использовать основное уравнение изнашивания [19, 20]. В полученные соотношения должны также входить физико-механические свойства пары материалов «инструмент – деталь».

Будем исходить из предположения, что основной характер деформирования микроповерхностей в установившемся режиме абразивного износа является линейно-упругим. Хрупкое разрушение обрабатываемой поверхности происходит при нагрузке, превышающей среднее упругое давление на пятне контакта, равное микропрочности материала σ [21]. Микропрочность соответствует напряжению, необходимому для

образования единицы площади хрупкого разрушения. Принимая, что размер алмазных зерен сопоставим с микронеровностями матрицы, моделируем поверхность композиционного материала в виде сферических сегментов одинакового радиуса R . Учитывая, что нагрузка в зоне контакта воспринимается как неровностями матрицы, так и выступающими зернами алмаза, и применяя для определения характеристик упругого контакта единичных сферических неровностей формулы Герца [22], получим упругое сближение контактирующих поверхностей в виде

$$a_y = Rp \left[\frac{1,5\pi q_a I_e}{tmv(v-1)K_3} \left(\frac{R}{Rp} \right)^{0,5} \right]^{\frac{1}{v+0,5}}, \quad (1)$$

где Rp , tm , v – параметры шероховатости взаимодействующих поверхностей [20, 23];

q_a – номинальное давление в контакте;

$I_e = \left(\frac{I_a I_c}{\tau I_c + (1-\tau) I_a} \right)$ – эквивалентная упругая постоянная;

$I_a = \frac{1-\mu_a^2}{E_a} + \frac{1-\mu_k^2}{E_k}$, $I_c = \frac{1-\mu_c^2}{E_c} + \frac{1-\mu_k^2}{E_k}$ – упругие постоянные контакта алмаз – контробразец, связка – контробразец;

E_a , E_c , E_k – модули упругости материалов алмаза, матрицы и контробразца;

μ_a , μ_c , μ_k – коэффициенты Пуассона материалов алмаза, керамической связки и контробразца;

K_3 – коэффициент, характеризующий опорную кривую [23].

Затем, распространив решение на множественный контакт шероховатых поверхностей, получим критическое номинальное давление q_{ax} в зависимости от физико-механических констант материалов и параметров профиля поверхностей трения:

$$q_{ax} = \left(\frac{tmv\sigma}{2} \right)^{2v+1} \times \left[\frac{1,5\pi I_e}{tmv(v-1)K_3} \left(\frac{R}{Rp} \right)^{0,5} \right]^{2v}, \quad (2)$$

где σ – микропрочность материала.

Исходя из предположения, что глубина шлифования минералокерамическим алмазосодержащим материалом обрабатываемой керамической поверхности равна величине упругого внедрения зерна [19, 20], и учитывая, что абразивное формообразование пары «инструмент – деталь» определяется суммарным объемом внедрившихся неровностей, получим формулу для расчета производительности шлифования

$$Q_t = \frac{SvtmRp}{2(v+1)n} \left[\frac{1,5\pi q_a I_e}{tmv(v-1)K_3} \left(\frac{R}{Rp} \right)^{0,5} \right]^{\frac{v+1}{v+0,5}} \frac{I_k}{I_e}, \quad (3)$$

где S – ширина зоны износа;

v – скорость взаимного перемещения инструмента и детали;

n – число циклов, приводящих к отделению частиц износа. В случае абразивного изнашивания керамического материала $n = 1$ [19, 20];

$$I_k = \frac{1-\mu_k^2}{E_k}.$$

Учитывая объемную плотность содержания алмазов в материале, выразим содержание алмазов в изношенном слое абразивного инструмента m_a за время шлифования t :

$$m_a = \frac{8,78 \cdot K S v t R p t m}{2(v+1)n} \left[\frac{1,5 \pi q_a I_e}{t m v (v-1) K_3} \left(\frac{R}{R_p} \right)^{0,5} \right]^{\frac{v+1}{v+0,5}} \left[\frac{I_{ac}}{I_e} \right], \quad (4)$$

где $I_{ac} = \frac{\tau(1-\mu_a^2)}{E_a} + \frac{(1-\tau)(1-\mu_c^2)}{E_c}$.

Введем величину удельного расхода алмазов q_V (отношение массы алмазов в изношенном абразивном слое к массе материала контробразца, сошлифованного за испытание) как характеристику износа алмазосодержащих абразивных инструментов:

$$q_V = 8,78 K \left[\frac{I_{ac}}{I_e} \right]. \quad (5)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

1. Влияние давления на производительность шлифования и расход алмазов.

Результаты экспериментов показали, что производительность шлифования прямо пропорциональна давлению (рис. 2), так как повышение нагрузки ведет к увеличению глубины внедрения алмазных зерен в обрабатываемый материал и, следовательно, к увеличению объема удаляемого за единицу времени материала для всех испытуемых образцов.

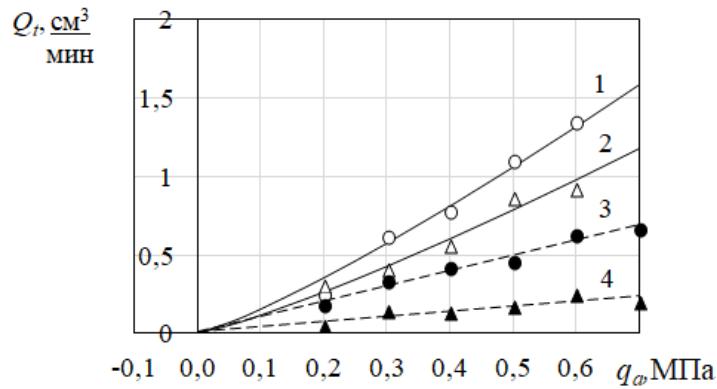


Рис. 2. Влияние давления q_a на производительность шлифования Q_t :
1 – АКМ, сплошные линии – расчет по формуле (3), точки – результаты эксперимента, $d = 100/80$; 2 – АКМ, $d = 63/50$; 3 – М1, $d = 63/50$; 4 – Б1, $d = 63/50$

Согласно формуле (3) $Q_t \sim q_a^{\frac{v+1}{v+0,5}}$ в степени несколько больше 1. Однако вопрос о предельно допустимом давлении сложен и должен решаться с учетом конкретных условий шлифования. Так, для широкого класса деталей из титаносодержащей керамики, имеющих толщину менее 0,05 мм, ограничением является их невысокая прочность: при превышении критического давления 0,05 МПа они растрескиваются [12]. При предварительной обработке более толстых заготовок, которые часто имеют коробления с неплоскостью более 0,5 мм, имеется опасность срыва их

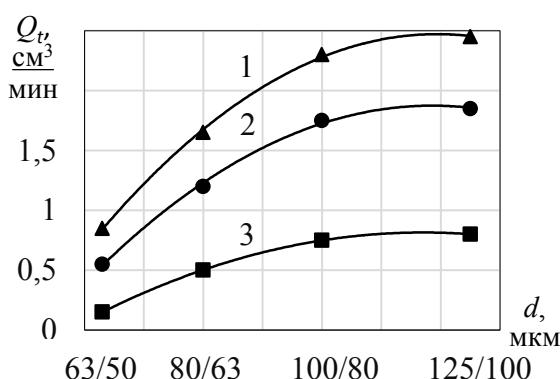
тангенциальными силами или откалывания кусков, не прилегающих к поверхности стола нормальной силой. При шлифовании пластин, имеющих неплоскость опорной поверхности менее 0,2 мм, срыв наблюдается при давлении 0,4 МПа. Кроме того, у многих шлифовальных станков шпиндель останавливается при превышении нагрузки 110...150 Н в зависимости от марки алмазного круга.

Таким образом, для шлифования с высокой производительностью необходимо стремиться к увеличению давления в пределах, ограниченных прочностью детали или возможностью станка.

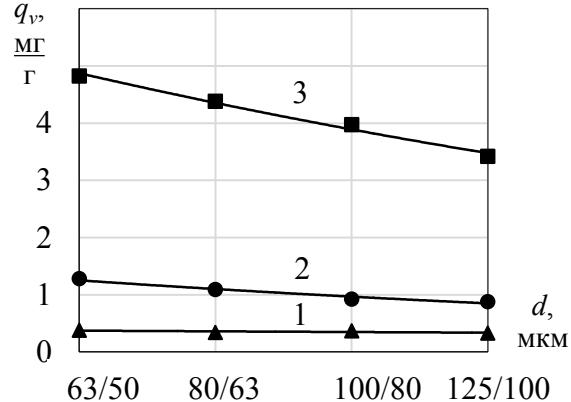
Величина критического давления, рассчитанная по формуле (2), в 1,35...2,68 раза ниже рекомендуемого давления при шлифовании керамики. Расчет, проведенный для черновой и чистовой обработки титаносодержащей и оксидной керамики, показал, что данное выражение может быть использовано для определения нижней границы давлений, так как при меньших давлениях шлифование невозможно.

Расход алмазов в изношенном слое абразивного инструмента $m_a \sim q_a^{\frac{v+1}{v+0,5}}$, т.е. возрастает аналогично производительности шлифования, практически прямо пропорционально давлению (формула (3)). Однако удельный расход алмазов q_v , согласно формуле (5), не зависит от давления при обработке твердых керамических материалов, поскольку с увеличением давления производительность шлифования керамической детали и объем изношенного абразивного керамического инструмента прямо пропорциональны и определяются только соотношением упругих свойств контактирующих материалов.

2. Влияние зернистости на производительность шлифования и расход алмазов. Зернистость алмазов в кругах является одним из наиболее сильно-действующих факторов, определяющих производительность шлифования керамики. Как показали экспериментальные исследования, с увеличением зернистости производительность шлифования растет сначала прямо пропорционально, а затем постепенно стремится к насыщению (рис. 3).



(а)



(б)

Рис. 3. Влияние зернистости d на производительность шлифования Q_t (а) и удельный расход алмазов q_v (б): 1 – АКМ; 2 – М1; 3 – Б1 (К – 100 %)

В работе [12] отмечено, что в некоторых случаях эта зависимость имеет экстремальный вид. Таким образом, при увеличении зернистости производительность увеличивается до насыщения, что полностью соответствует соотношению (3). Анализируя формулу (3), можно сказать, что влияние зернистости на произво-

дительность шлифования определяется комплексом: $(d)^{\frac{v+1}{2v+1}}$. Соответственно, в зависимости от вида обработки поверхности, учитывая типичные значения v [23], получим:

$$\begin{cases} Q_t \sim d^{0,8} & \text{шлифование} \\ Q_t \sim d^{0,6} & \text{фрезерование, полирование.} \end{cases} \quad (6)$$

Эксперименты показали, что удельный расход алмазов абразивного круга из АКМ практически не зависит от размера алмазных зерен (рис. 5б), что можно считать подтверждением формулы (5). У материалов с традиционными матрицами при увеличении зернистости расход алмазов значительно снижается.

3. Влияние концентрации алмазов на производительность шлифования и износ инструмента. При увеличении концентрации алмазов производительность шлифования снижается для образцов со связками М1 и Б1. У образца из АКМ Q_t практически не изменяется во всем исследуемом диапазоне концентраций (рис. 4). При увеличении K возрастает число алмазных выступов, непосредственно участвующих в контактном взаимодействии, соответственно, нагрузка, приходящаяся на одно зерно, снижается, как и глубина его внедрения в обрабатываемую поверхность. Как следствие, объем сошлифованного материала не изменяется. Для абразивных инструментов с мягкими матрицами при увеличении концентрации затрудняется удаление частиц износа из зоны контакта, глубина резания уменьшается и производительность шлифования снижается. Алмазосодержащие керамические материалы не подвержены засаливанию, поэтому Q_t для них не зависит от концентрации. Теоретически концентрация алмазов влияет на Q_t опосредованно, через упругие постоянные композиционного материала и обрабатываемой детали (формула (3)).

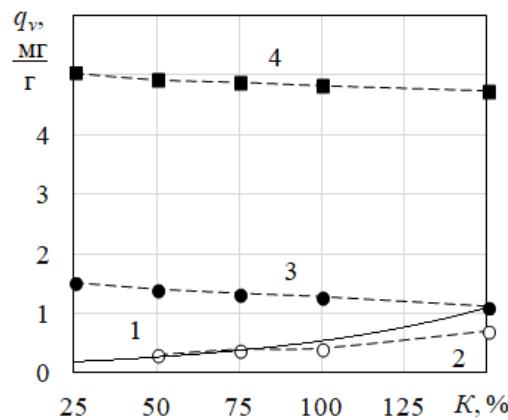


Рис. 4. Влияние концентрации алмазов K на удельный расход q_V :
 $q_a = 0,5$ МПа, $d = 63/50$: 1 – расчет по формуле (5); 2 – результаты эксперимента АКМ;
3 – матрица М1; 4 – матрица Б1

Эксперименты показали, что влияние концентрации алмазов на относительную износостойкость (удельный расход алмазов) зависит от вида связки. При использовании более мягких матриц удельный расход алмазов снижается с увеличением концентрации, а у АКМ возрастает. Для кругов с керамическими связками данный результат можно объяснить снижением прочности композиционного материала при увеличении концентрации алмазов и отсутствием засаливания режущих

поверхностей. У традиционных, более мягких матриц под действием нагрузки, температуры и значительно хуже удаляемых продуктов износа алмазы как бы заполировываются в режущую поверхность.

Полученная зависимость q_V от концентрации носит степенной характер, так как $K(\tau)$ определяет упругую постоянную АКМ (формула (1)). Теоретические и экспериментальные результаты оценки удельного расхода алмазов для АКМ имеют схожие тенденции изменения.

В работе [13] установлено, что влияние концентрации на работоспособность абразивных алмазосодержащих материалов неоднозначно: большое значение имеют жесткость системы «абразивный инструмент – обрабатываемая деталь» и интенсивность износа режущей поверхности. Однаковая пара испытуемых материалов в зависимости от модификации станка, условий нагружения и подачи показывала отличающиеся тенденции (возрастание/убывание) изменения Q_t и q_V .

4. Оценка шероховатости обрабатываемой поверхности детали. Анализ изменения морфологии поверхности контробразца показал, что в наибольшей степени она определяется зернистостью абразивного инструмента: с возрастанием зернистости алмазов шероховатость обрабатываемой детали растет независимо от материалов связки [24]. С учетом влияния концентрации алмазов в инструменте и соотношения микротвердостей материалов матрицы и контробразца получим эмпирическую формулу для оценки шероховатости поверхности детали:

$$Ra = 8,81 \cdot 10^{-19} \cdot d^4 \cdot H_M^{0,67} \cdot H_K^{0,54} \cdot \left(\frac{10^{-4} \tau^2 + 1,25}{10^{-4} \tau^2 + 1} \right), \quad (7)$$

где d – зернистость алмазов (нижняя фракция) в АКМ, мкм;

H_M и H_K – микротвердость материалов матрицы и контробразца соответственно, Па.

Установлено, что нагрузка на абразивный инструмент практически не влияет на шероховатость получаемой поверхности керамической детали. Скорость вращения абразивного инструмента влияет опосредованно, через изменение физико-механических характеристик взаимодействующих поверхностей (рассмотрено ниже). В целом с увеличением скорости скольжения (частоты вращения) инструмента шероховатость поверхности образца снижается. Профиль поверхности абразивного АКМ практически не изменяется в процессе эксплуатации [24].

5. Оценка глубины шлифования. При высоком давлении на контакте q_a , когда зерна алмаза погружаются на полную высоту выступающей части, матрица соприкасается с обрабатываемым материалом. При этом зерна испытывают большую перегрузку, интенсивно разрушаются и притупляются. Из-за медленного истирания матрицы новые зерна не успевают обнажаться, и, если не происходит сильного нагрева, поверхность заполированывается. При сильном нагреве обрабатываемый материал размягчается и забивает промежутки между зернами, препятствуя истиранию матрицы. В этом случае инструмент засаливается.

При благоприятном режиме работы инструмента обрабатываемая поверхность непосредственно не контактирует с матрицей, между ними остается пространство, которое непрерывно заполняется стружкой, вымываемой смазочно-охлаждающей жидкостью. Стружка проходит по матрице и в результате абразивного действия истирает ее. Новые зерна своевременно обнажаются, обеспечивая устойчивую работоспособность инструмента. Это наиболее благоприятный режим для работы алмазных зерен и инструмента в целом. Установлено, что для создания таких условий необходим режим работы инструмента, при котором отношение между глубиной

врезания и средним размером зерна находится в пределах 0,12...0,15. Учитывая, что глубина шлифования равна величине упругого внедрения зерна a_y (формула (1)), отношение a_y к зернистости круга d должно составлять около 0,135.

6. Оценка влияния дополнительных факторов. Прочность алмазосодержащего материала снижается с увеличением концентрации алмазов, уменьшением зернистости и шероховатости поверхности алмазного зерна. Снижение прочности при увеличении концентрации алмазов и их дисперсности не позволяет изготавливать АКМ с концентрацией выше 150, что соответствует 37 % объема. Кроме того, одновременное увеличение концентрации и дисперсности алмазов до 10...15 мкм более интенсивно снижает прочность, и, следовательно, оптимальные концентрации алмазов K не должны превышать 50...100.

Для шлифования керамики чаще всего применяют круги с марками алмазов АСР, АСН и АСВ. Установлено, что в широком диапазоне условий шлифования режущая способность кругов с алмазными зернами АСР и АСВ практически одинакова. По-видимому, это объясняется тем, что зерна АСР, как более шероховатые, образуют рабочую поверхность круга с большим количеством элементов, но внедряются они в заготовку на меньшую глубину, чем меньшее количество зерен АСВ. Удаленные объемы материала от большего числа мелких царапин и меньшего числа более глубоких царапин примерно равны. Данный вывод подтверждается результатами профилирования поверхности обрабатываемой керамики.

В рамках данного исследования натурные скоростные фрикционные испытания не проводились. Согласно теоретической модели производительность шлифования прямо пропорциональна скорости. В работе [7] показана прямо пропорциональная или степенная зависимость от скорости. Авторы [12] отмечают, что в некоторых случаях при увеличении скорости обработки производительность шлифования приобретает экстремальный характер. Однако круги из АКМ имеют вероятность разрыва центробежными силами на повышенных скоростях обработки, что не гарантирует безопасность работ. Многие изготовители алмазного инструмента ограничивают рекомендуемые скорости величиной 15...30 м/с. В указанном диапазоне скорость несущественно влияет на производительность шлифования, поэтому данный фактор можно не принимать во внимание.

При скоростях скольжения менее 30 м/с и хорошей подаче смазочно-охлаждающей жидкости можно пренебречь неконтролируемой графитизацией алмазных зерен. Изменение физико-механических свойств материалов контактирующих поверхностей вследствие фрикционного разогрева носит локальный характер. Для АКМ, имеющих тугоплавкую керамическую матрицу из Al_2O_3 , влияние повышения температуры менее существенно, чем для алмазных инструментов с металлическими или органическими связками. Кроме того, алюминиевая подложка АКМ хорошо отводит тепло.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При высокоэффективном шлифовании керамики алмазосодержащими инструментами с керамическими матрицами определяющими факторами являются нагрузка на инструмент, его зернистость и концентрация алмазов, физико-механические свойства взаимодействующих материалов, глубина подачи.

При увеличении давления производительность шлифования АКМ и расход алмазов в изношенном слое абразивного инструмента возрастают пропорционально давлению $Q_t \sim q_a^{1,2} \dots q_a^{1,3}$ в зависимости от вида шлифования. Удельный расход алмазов не зависит от давления при обработке твердых керамических материалов.

При увеличении зернистости производительность шлифования растет, а затем постепенно стремится к насыщению: $Q_t \sim d^{0,6} \dots d^{0,8}$. Удельный расход алмазов абразивного круга из АКМ практически не зависит от размера алмазных зерен, в отличие от традиционных материалов, для которых q_V снижается с ростом зернистости.

Влияние концентрации алмазов на производительность шлифования и расход алмазов зависит от механических свойств матрицы, обрабатываемой детали и жесткости системы «абразивный инструмент – обрабатываемая деталь». При изготовлении инструментов из АКМ производительность шлифования не изменяется в диапазоне $K = 25 \dots 150 \%$. По результатам теоретических и экспериментальных исследований установлено, что удельный расход алмазов АКМ возрастает с увеличением зернистости.

Шероховатость поверхности детали в основном определяется зернистостью абразивного инструмента, концентрацией зерен алмаза, соотношением твердости материалов связки и детали.

Рассмотрены предпочтительные диапазоны глубины шлифования, скоростей скольжения системы «инструмент – деталь», оценены марки алмазов. Инструменты из алмазосодержащего материала с керамической связкой рекомендуется применять для прецизионной обработки керамических деталей и минералов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Wang J., Huang G. Review on manufacturing diamond abrasive tools by additive manufacturing technology // *Diamond and Abrasives Engineering*. 2022. V. 42. № 3. P. 307–316.
2. Pandiyan V., Caesarendra W., Tjahjowidodo T., Tan H.H. In-process tool condition monitoring in compliant abrasive belt grinding process using support vector machine and genetic algorithm // *Journal of Manufacturing Processes*. 2018. V. 31. P. 199–213.
3. Deja M., Zieliński D. Wear of electroplated diamond tools in lap-grinding of Al_2O_3 ceramic materials // *Wear*. 2020. V. 460. P. 203461.
4. Young C., Blunt L., Tong Z. Development of an ultra-precision grinding technique for the production of structured micro-patches on ceramics and tool steel // *In Proceedings of the 17th International Conference of the European Society for Precision Engineering and Nanotechnology, EUSPEN*. 2017. P. 207–208.
5. Eder S.J., Grützmacher P.G., Spenger T., Heckes H., Rojacz H., Nevosad A., Haas F. Experimentally validated atomistic simulation of the effect of relevant grinding parameters on work piece topography, internal stresses, and microstructure // *Friction*. 2022. V. 10. № 4. P. 608–629.
6. Kalita K., Chakraborty S., Ghadai R.K., Chakraborty S. Parametric optimization of non-traditional machining processes using multi-criteria decision making techniques: literature review and future directions. *Multiscale and Multidisciplinary Modeling, Experiments and Design // Springer Science and Business Media*. 2023. V. 6. P. 1–40.
7. Судник Л.В., Витязь П.А., Ильющенко А.Ф. Алмазосодержащие абразивные нанокомпозиты. Минск: Беларуская наука, 2012. 319 с.
8. Shenderova O., Gruen D.M. *Ultrananocrystalline Diamond: Synthesis, Properties, and Applications*. Elsevier Inc, 2006. 600 p.
9. Витязь П.А., Судник Л.В., Бойко А.А. Алмазосодержащая керамика для абразивной обработки. Минск: Бестпринт, 2004. 196 с.
10. Li L., Zhang Y., Cui X., Said Z., Sharma S., Liu M. Mechanical behavior and modeling of grinding force: A comparative analysis // *Journal of Manufacturing Processes*. 2023. V. 102. P. 921–954.

11. Fedorovich V., Pyzhov I., Ostroverkh Y. Methodology of definition of optimal diamond wheel characteristics at stages of production and operation // *Cutting & Tools in Technological System*. 2022. V. 96. P. 42–51.
12. Ваксер Д.В., Иванов В.А., Никитков Н.В., Рабинович В.Б. Алмазная обработка технической керамики. Л.: Машиностроение, 1976. 160 с.
13. Попов С.А. Алмазно-абразивная обработка металлов и твердых сплавов. М.: Машиностроение, 1977. 263 с.
14. 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.
15. Новиков В.В., Новикова О.О., Болотов А.Н. Особенности структуры и применение материалов, сформированных в электролитной плазме // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2023. № 3 (19). С. 5–13.
16. 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.
17. Новикова О.О., Болотов А.Н., Новиков В.В. Моделирование износа пары трения «алмазосодержащая минералокерамика – керамика» // *Вестник машиностроения*. 2024. Т. 103. № 4. С. 299–304.
18. ГОСТ 19300-86. Средства измерений шероховатости поверхности профильным методом. Профилографы-профилометры контактные. Типы и основные параметры. М.: Изд-во стандартов, 1996. 10 с.
19. Крагельский И.В., Добычин М.Н., Комбалов В.С. Основы расчетов на трение и износ. М.: Машиностроение, 1977. 526 с.
20. Чичинадзе, А.В. Берлинер Э.М., Браун Э.Д. Трение, износ, смазка (трибология и триботехника). М.: Машиностроение, 2003. 576 с.
21. Пушкарев О.И., Кулик О.Г., Никуйко Л.А. Размерный эффект и его влияние на микромеханические свойства абразивных материалов // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2017. Т. 83. № 2. С. 49–52.
22. Johnson K.L. *Contact mechanics*. Cambridge: Cambridge University Press, 2001. 452 p.
23. Демкин Н.Б., Рыжов Э.В. Качество поверхности и контакт деталей машин. М.: Машиностроение, 1981. 244 с.
24. 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.

Для цитирования: Болотов А.Н., Новиков В.В., Новикова О.О. Прецизионная алмазно-абразивная обработка керамических материалов // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2025. № 3 (27). С. 23–34.

PRECISION DIAMOND-ABRASIVE PROCESSING OF CERAMIC MATERIALS

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

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

The influence of load-speed wear conditions and the structural composition of ceramic diamond material on the grinding performance and consumption of abrasive tools is investigated. It is established that the determining factors are the load on the tool, its grain size and diamond concentration, the physical and mechanical properties of interacting materials, and the feed depth. The ratios of abrasive wear parameters depending on the type of grinding were obtained. Practical recommendations are given on the selection of ranges of grain size, diamond concentration, grinding depth, and processing speed. The diamond grades are evaluated.

Keywords: precision machining, grinding performance, diamond consumption, grinding modes, diamond-abrasive processing, ceramic binder.

Поступила в редакцию/received: 10.03.2025; после рецензирования/revised: 12.03.2025;
принята/accepted: 19.03.2025

УДК 621.791.92

АБРАЗИВНАЯ ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ ХРОМОНИКЕЛЕВОГО НАПЛАВЛЕННОГО ПОКРЫТИЯ

М.В. НОВОСЕЛОВА, канд. техн. наук, Л.Е. АФАНАСЬЕВА, канд. физ.-мат. наук

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

© Новоселова М.В., Афанасьева Л.Е., 2025

Представлены результаты экспериментальных исследований абразивной износостойкости покрытий, сформированных плазменно-порошковой наплавкой на различных токах дуги. Использовался порошок хромоникелевого сплава марки Colmonoy 315-P2. Лабораторные испытания на изнашивание о закрепленный абразив выявили значительную неоднородность износостойкости исследуемых никелевых наплавок, что может свидетельствовать о неоднородных механических свойствах и структуре поверхностного слоя наплавленного материала. По величине износостойкости исследованные покрытия относятся к 6-му классу, что можно признать средним результатом.

Ключевые слова: плазменная порошковая наплавка, хромоникелевый сплав, абразивная износостойкость, твердость.

DOI: 10.46573/2658-5030-2025-3-34-41

ВВЕДЕНИЕ

Перспективным методом восстановления изношенных деталей узлов трения, а также упрочнения контактных поверхностей новых изделий является порошковая наплавка [1–3]. Для ее реализации используют различные материалы и технологии (лазерную, плазменную наплавку и некоторые другие). Большое внимание исследователей и практиков привлекают износостойкие материалы на основе никеля, в частности хромоникелевые сплавы системы NiCrBSi.

Суперсплавы на основе никеля уже нашли широкое практическое применение в атомной, нефтехимической, горнодобывающей, оборонной промышленности, сельскохозяйственном машиностроении и многих других отраслях. По результатам обширных научных исследований опубликовано множество научных статей, например [4–8]. Однако интерес к этим сплавам не снижается, что связано прежде всего с высокими технологическими, механическими, эксплуатационными свойствами сплавов системы NiCrBSi, потенциал которых раскрыт не полностью.

В статье [1] представлены результаты анализа структурного состояния покрытия состава NiCrBSi, полученного порошковой плазменной наплавкой. Цель настоящей работы – провести фрикционные испытания поверхностного слоя покрытия состава NiCrBSi, полученного порошковой плазменной наплавкой на различных режимах.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для проведения экспериментальных исследований использовали образцы покрытий, полученных плазменной наплавкой порошка хромоникелевого сплава марки Colmonoy 315-P2 на подложку из алюминиевой бронзы марки БрА9Ц8Н15. Химический состав порошкового материала и материала подложки приведен в статье [1]. Там же описана технология нанесения покрытия и изготовления исследуемых образцов.

Многообразие процессов изнашивания отражается в наличии целого ряда отечественных и зарубежных стандартов, регламентирующих технические средства и методики испытаний на износостойкость [9]. Для целей данного исследования представляют интерес испытания на износостойкость в процессе непосредственного взаимодействия при трении контактирующих поверхностей. Поставленной в данной работе цели частично соответствует метод испытаний на абразивное изнашивание о закрепленные абразивные частицы (ГОСТ 17367-71), согласно которому исследуемый и эталонный образцы изнашивают о поверхность абразивной бумаги. Цилиндрический образец трется об абразивную поверхность торцевой поверхностью. Недостатком метода является малый диаметр цилиндрического образца – всего 2 мм. На такую поверхность трудно нанести исследуемое покрытие. В наибольшей степени цели настоящего исследования соответствует метод испытаний по стандарту ASTM G 133 "Standard Test Method for Linearly Reciprocating Ball-on-Flat Sliding Wear" («Стандартный метод испытаний на износ при линейном возвратно-поступательном скольжении шара по плоскости»). В этом методе шаровой образец диаметром примерно 9,5 мм совершает возвратно-поступательное скольжение по плоскому образцу с частотой 10 Гц и амплитудой 5 мм. Общий путь трения 100 м.

Использованный в данной работе метод испытаний покрытия на износостойкость сочетает возможности двух описанных выше методов. В использованном нами методе испытание на изнашивание образцов наплавленного

покрытия проводили о закрепленные абразивные частицы по схеме «шар – плоскость». В качестве шарового контробразца использовали стальной сферический наконечник диаметром 1 мм с алмазным напылением, размер алмазного зерна составлял 40...50 мкм. К контакту прикладывали нагрузку N в 0,5 Н. Износостойкость определяли в процессе возвратно-поступательных движений шарового контробразца по плоской поверхности исследуемого образца с частотой 20 Гц и амплитудой 2,5 мм. Абразивному изнашиванию подвергались поверхности трех образцов, которые были получены при разных режимах наплавки, соответствующих силе тока 66, 83 и 94 А.

Износостойкость материала, полученного порошковой плазменной наплавкой, может значительно отличаться по ширине наплавки [10, 11], поэтому в наших экспериментах канавки изнашивания располагали: 1) в центральной части и 2) ближе к внешнему краю валика наплавленного материала.

В связи с тем, что износостойкость может отличаться по высоте плазменной порошковой наплавки (глубине от поверхностного слоя) [10, 11], образцы испытывали на износостойкость в течение 10 или 30 мин. Путь трения $L_{\text{тр}}$ составил соответственно 100 и 350 м. Глубину канавки изнашивания h измеряли профилометром контактным модели 130. На рис. 1 представлена графическая зависимость линейного износа h от времени испытаний t . На участке 0...10 мин скорость изнашивания в 1,5 раза больше, чем на участке 10...30 мин, установившийся режим изнашивания не наблюдается.

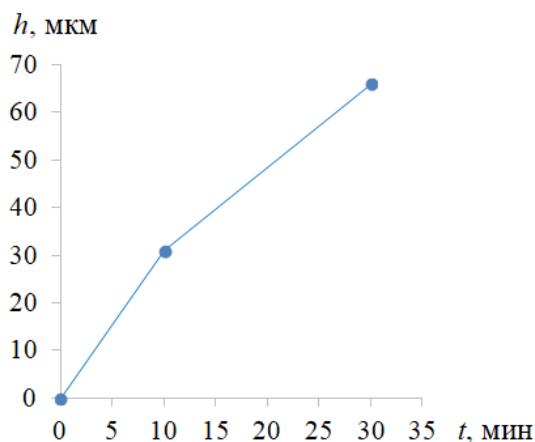


Рис. 1. Глубина канавки изнашивания образца, полученного при силе тока 66 А

После испытаний образцов проводили профилометрирование канавок изнашивания. По поперечным профилограммам (перпендикулярно направлению движения шарового контробразца) измеряли глубину канавки изнашивания. Затем рассчитывали линейную I_h и объемную I_V интенсивности изнашивания (ГОСТ 27674-88).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Одним из важных триботехнических параметров материала является его твердость. На микромасштабном уровне (микротвердость) измерения проводили на приборе ПМТ-3 по ГОСТ 9450-76. На макромасштабном уровне твердость

индентирования по ГОСТ Р 8.748-2011 (ИСО 14577-1:2002) (макротвердость) измеряли на специально изготовленном твердомере с использованием конического индентора Роквелла при нагрузке 90 Н. Величины твердости со среднеквадратичным отклонением представлены на рис. 2.

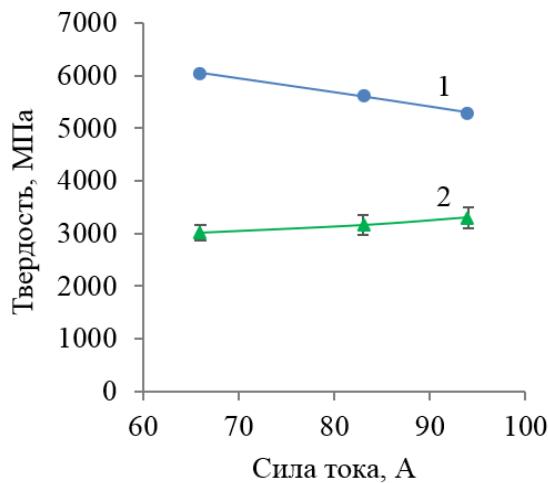


Рис. 2. Зависимость микротвердости (1) и макротвердости (2) исследованных наплавок от режима нанесения покрытия

Влияние твердости материала на его абразивную износостойкость отражено в известном уравнении Арчарда

$$I_V = K \frac{N}{H},$$

где I_V – объемная интенсивность изнашивания;

K – коэффициент изнашивания;

N – нормальная нагрузка на контакт;

H – твердость.

Согласно уравнению Арчарда, износостойкость I материала (величина, обратная I_h) возрастает с ростом его твердости, что подтверждено многочисленными экспериментами [12–14], хотя зависимость $I_h(H)$ не обязательно строго обратно пропорциональная. Элемент случайности в зависимости $I_h(H)$ связан с тем, что абразивная износостойкость, помимо чисто механических (прочностных) характеристик материала, к числу которых относится твердость, зависит также от его структуры [10, 11, 15].

Результаты испытаний на износостойкость приведены на рис. 3.

Анализ рис. 3(а), (б) (меньшее время испытаний) не позволяет выявить какую-либо однозначную зависимость интенсивности изнашивания от тока. Износостойкость в центральной части наплавленных валиков закономерно выше, максимум в 1,3 раза (интенсивность изнашивания ниже), это различие является незначительным.

Из рис. 3(в), (г) (большее время испытаний) видно, что интенсивность изнашивания в центральной и периферийной части наплавленных валиков может различаться в 2 раза, при этом характер соотношения величины износа в центре и на периферии части трех образцов неодинаков. Так, меньшая по величине интенсивность изнашивания в центральной части у образца, наплавленного при силе тока 66 А, в

периферийной – при 94 А. Интенсивность изнашивания образца, изготовленного при силе тока 83 А, в центре и на периферии одинакова как при 10-минутном испытании наплавки (рис. 3(а), (б)), так и при 30-минутном (рис. 3(в), (г)). Широкий диапазон значений I_h и I_V свидетельствует о неоднородных свойствах поверхностного слоя материала.

Однозначный характер влияния силы тока на интенсивность изнашивания на рис. 3(в) и (г) также не наблюдается. Повышение силы тока может приводить как к повышению износостойкости, так и к ее снижению. Аналогичные результаты получены в работе [16]. Поскольку микротвердость исследуемых образцов практически одинакова, изменение абразивной износостойкости может быть связано с ролью структурного фактора.

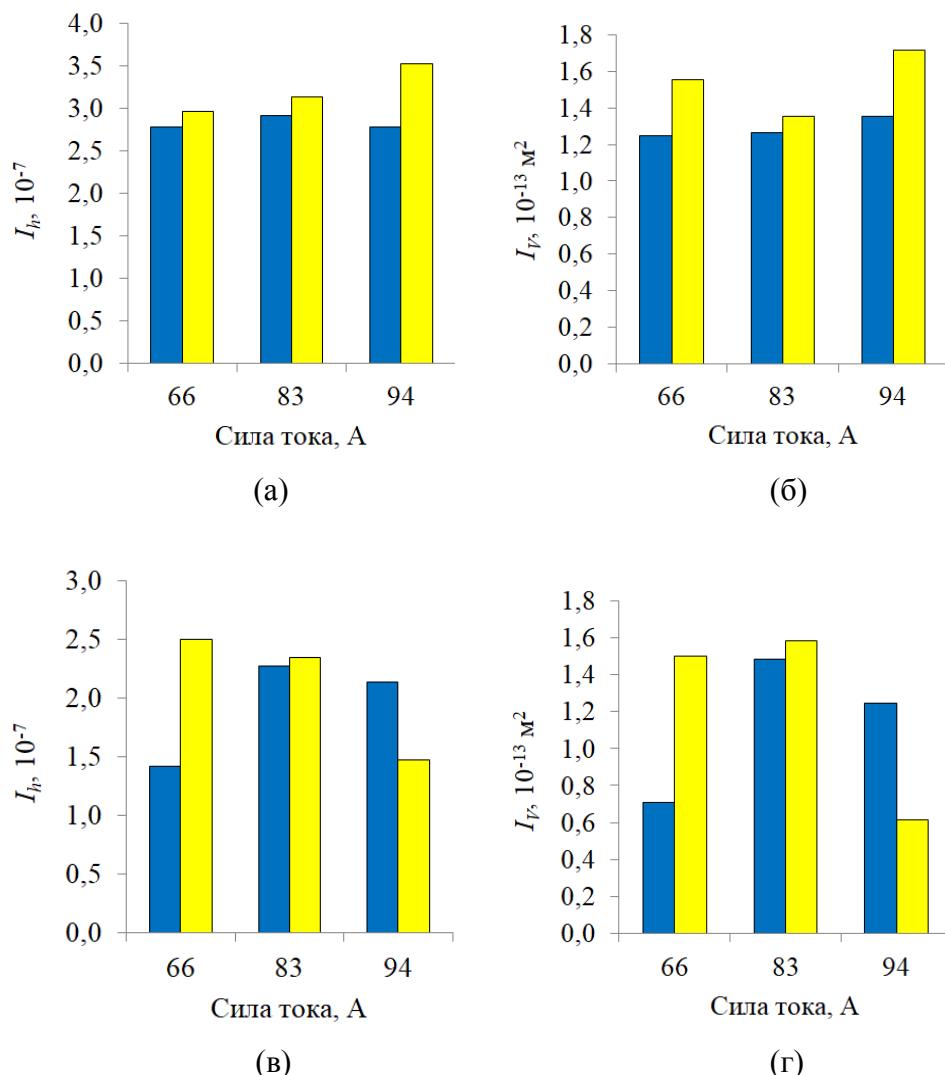


Рис. 3. Линейная и объемная интенсивность изнашивания исследуемых образцов:
время испытаний 10 мин (а), (б); 30 мин (в), (г);
■ – в центральной части; ■ – в периферийной части

Сравнение усредненных значений интенсивности изнашивания $\langle I_V \rangle$ в центральной и периферийной областях одной и той же поверхности представлены на рис. 4.

В таблице приведены усредненные величины коэффициента изнашивания K в уравнении Арчарда и значения износостойкости испытанных покрытий. Абразивная износостойкость исследованных образцов практически не зависит от силы тока (рис. 4), что коррелирует с практически отсутствующим влиянием силы тока на твердость наплавки (см. рис. 2).

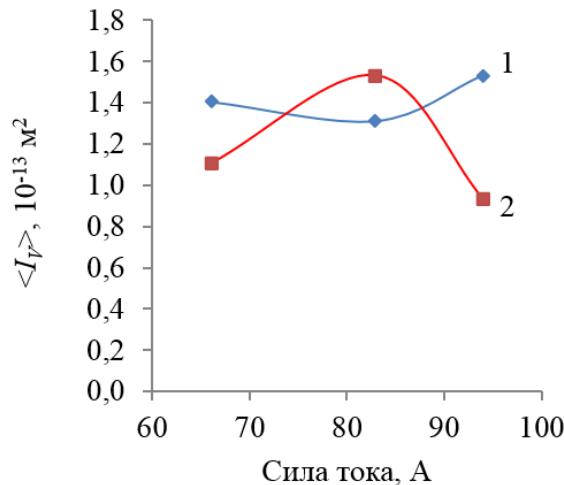


Рис. 4. Средние значения объемной интенсивности изнашивания исследуемых наплавок: 1 – время испытаний 10 мин; 2 – 30 мин

Характеристики изнашивания исследованных образцов

Сила тока, А	$K, 10^{-4}$		$I = 1 / I_h, 10^6$	
	10 мин	30 мин	10 мин	30 мин
66	8,5	6,8	3,5	5,1
83	8,2	9,7	3,3	4,3
94	10,1	6,2	3,2	5,5

Полученные экспериментально значения коэффициента изнашивания K исследуемых образцов сравнимы по порядку величины с известными значениями для упрочненных инструментальных сталей [17] и примерно на порядок меньше соответствующих значений для абразивного изнашивания сталей о закрепленный абразив [18].

По величине износостойкости все исследованные покрытия относятся к 6-му классу износостойкости из 13 существующих, что является средним показателем.

Для сравнения, характеристики износостойкости аналогичного по составу покрытия, полученного с помощью лазерных технологий, на порядок выше:

линейная интенсивность изнашивания I_h порядка 10^{-8} ,

объемная интенсивность изнашивания I_V порядка 10^{-14} м^2 ;

износостойкость соответствует 7–8-му классу [19].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Лабораторные испытания на абразивное изнашивание выявили значительную неоднородность износостойкости исследуемых хромоникелевых покрытий. Величина интенсивности изнашивания значительно отличается по ширине и глубине наплавок, полученных при силе тока 66 и 93 А. Наплавка, сформированная при силе тока 83 А, характеризуется более однородными характеристиками изнашивания. При данных режимах изготовления не выявлено зависимости между интенсивностью изнашивания и твердостью наплавки. Исследование влияния структурного фактора на износостойкость является целью дальнейших исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сахаров К.А., Афанасьева Л.Е. Порошковая плазменная наплавка износостойкого покрытия // *Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел, деталей технологического и энергетического оборудования*. 2024. № 17. С. 89–95.
2. Афанасьева Л.Е., Сахаров К.А. Порошковая лазерная наплавка износостойкого композиционного покрытия // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2024. № 1 (21). С. 21–26.
3. Афанасьева Л.Е., Смолякова И.А. Порошковая лазерная наплавка быстрорежущей стали // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2024. № 2 (22). С. 29–35.
4. Savrai R.A., Soboleva N.N., Malygina I.Yu., Osintseva A.L. The structural characteristics and contact loading behavior of gas powder laser clad CoNiCrW coating // *Optics & Laser Technology*. 2020. V. 126. P. 106079.
5. Афанасьева Л.Е., Раткевич Г.В., Новоселова М.В. Роль структурного фактора в повышении износостойкости Ni – Cr – B – Si покрытия после лазерной обработки // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2019. № 9. С. 55–60.
6. Balaguru S., Gupta M. Hardfacing studies of Ni alloys: A critical review // *Journal of materials research and technology*. 2021. V. 10. P. 1210–1242.
7. Singh V.P., Kumar D., Mahesh V., Harursampath D., Kuriachen B. Role of interfacial shear strength in nanotribological behaviour of PTA deposited Colmonoy 6 coating on SS304 steel // *Materials Letters*. 2023. V. 353. P. 135287.
8. Wu Z., Wang B., Jin D., Xie M., Lui X., Lu S. Effect of Co-Ni-Cr-W and Ni-Cr-B-Si Alloy Coatings Upon the Hot Corrosion-fatigue Resistance of Several Heat-Resisting Steels // *Journal of Chinese Society for Corrosion and protection*. 2009. V. 1. № 4. P. 60–67.
9. Комбалов В.С. Методы и средства испытаний на трение и износ конструкционных и смазочных материалов: справочник / под ред. К.В. Фролова, Е.А. Марченко. М.: Машиностроение, 2008. 384 с.
10. Паркин А.А., Жаткин С.С., Минаков Е.А. Влияние структуры и свойств на износ покрытия Micro Melt NT-60 после плазменной порошковой наплавки // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2011. Т. 13. № 4 (3). С. 847–852.
11. Минаков Е.А., Жаткин С.С., Паркин А.А., Фураев О.С., Климов В.Г. Влияние режимов плазменной наплавки, структурных факторов и свойств на износостойкость наплавленного порошкового материала Stellite 190W // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2011. Т. 13. № 4 (3). С. 818–823.

12. Хрущев М.М. Закономерности абразивного изнашивания // Хрущев М.М. Трение, износ и микротвердость материалов: Избранные работы (к 120-летию со дня рождения). М.: КРАСАНД, 2012. С. 45–77.
13. Дроздов Ю.Н. Прогнозирование изнашивания с учетом механических, физико-химических и геометрических факторов // Современная трибология: итоги и перспективы / отв. ред. К.В. Фролов. М.: ЛКИ, 2014. С. 24–32.
14. Хопин П.Н., Шишкин С.В. Трибология: учебник для вузов. М.: Юрайт, 2021. 236 с.
15. Макаров А.В., Соболева Н.Н., Малыгина И.Ю. Роль упрочняющих фаз в сопротивлении абразивному изнашиванию NiCrBSi покрытий, сформированных лазерной наплавкой // Трение и износ. 2017. Т. 38. № 4. С. 311–318.
16. Нефедьев С.П., Дема Р.Р., Котенко Д.А. Абразивная и ударно-абразивная износостойкость твердых наплавленных покрытий // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Металлургия». 2015. Т. 15. № 1. С. 103–106.
17. Мышкин Н.К., Кончиц В.В., Браунович М. Электрические контакты. Долгопрудный: Издательский дом «Интеллект», 2008. 560 с.
18. Попов В.Л. Механика контактного взаимодействия и физика трения. От нанотрибологии до динамики землетрясений. М.: Физматлит, 2013. 352 с.
19. Раткевич Г.В. Повышение износостойкости поверхностей трения модифицированием структуры сплавов лазерным излучением: дис. ... канд. техн. наук. Тверь, 2021. 137 с.

Для цитирования: Новоселова М.В., Афанасьева Л.Е. Абразивная износостойкость хромоникелевого наплавленного покрытия // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2025. № 3 (27). С. 34–41.

ABRASIVE WEAR RESISTANCE OF CHROMIUM-NICKEL DEPOSITED COATING

M.V. NOVOSELOVA, Cand. Sc., L.E. AFANASIEVA, Cand. Sc.

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

The article presents the results of experimental studies of abrasive wear resistance of coatings formed by plasma-powder surfacing at different arc currents. The powder of chromium-nickel alloy of the Colmonoy 315-P2 brand was used. Laboratory tests for wear on fixed abrasive revealed significant heterogeneity of wear resistance of the studied nickel surfacings, which may indicate non-uniform mechanical properties and structure of the surface layer of the deposited material. In terms of wear resistance, the studied coatings belong to class 6, which can be considered an average result.

Keywords: plasma powder welding, chromium-nickel alloy, abrasive wear resistance, hardness.

Поступила в редакцию/received: 22.02.2025; после рецензирования/revised: 12.03.2025;
принята/accepted: 19.03.2025

ОПТИМИЗАЦИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО РЕЖИМА ЛАЗЕРНОЙ РЕЗКИ БИМЕТАЛЛИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА ПО КРИТЕРИЮ МИНИМУМА ШЕРОХОВАТОСТИ

В.В. ИЗМАЙЛОВ, д-р техн. наук, М.В. НОВОСЕЛОВА, канд. техн. наук,
Л.Е. АФАНАСЬЕВА, канд. физ.-мат. наук

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

© Измайлова В.В., Новоселова М.В., Афанасьева Л.Е., 2025

Статья посвящена исследованию влияния параметров лазерной резки на качество поверхности реза. Объект исследования – биметаллический материал, представляющий собой наплавленную быстрорежущую сталь на подложку конструкционной стали. Критерием качества поверхности реза выступает параметр шероховатости $Rz5$ по ГОСТ Р ИСО 9013-2022, а характеристикой режимов резки – комплексный параметр q , имеющий физический смысл энергии лазерного излучения, приходящейся на единичную площадку поверхности реза. Выявлено неоднородное распределение параметра $Rz5$ по поверхности реза, которое иллюстрируется графическими зависимостями $Rz5(x/h)$, где x – расстояние от верхней кромки реза; h – толщина разрезаемого образца. Экспериментально определены оптимальные значения комплексного энергетического параметра q для данного биметаллического материала, обеспечивающие минимальные значения шероховатости.

Ключевые слова: лазерная резка, энергетические параметры, шероховатость поверхности, наплавка, быстрорежущая сталь, биметалл.

DOI: 10.46573/2658-5030-2025-3-42-48

ВВЕДЕНИЕ

Технология лазерной резки отличается высокой производительностью и точностью раскroя листового материала. Она позволяет разделять керамику, металлы, полимеры, композиты на их основе и используется во многих отраслях промышленности и медицины [1–4]. В обзоре [1] отмечается, что, несмотря на широкое практическое применение данной технологии в течение нескольких десятков лет, в мировой науке наблюдается неуклонный рост публикаций по данному направлению, т.е. научный интерес к технологии лазерной резки высок. Это можно объяснить сложностью и многофакторностью протекающих во время резки процессов и не раскрытыми в полной мере потенциальными возможностями технологии.

В публикациях, посвященных исследованию влияния параметров лазерной резки на качество поверхности реза, различными авторами в качестве критерия оптимизации рассматриваются как отдельные параметры (мощность излучения, скорость резки, давление технологического газа, фокусировка луча и др.), так и комплексные [5–7].

Одним из ключевых параметров процесса лазерной резки материала является скорость резки, которая зависит, в частности, от толщины разрезаемого материала. Как показывают эксперименты, во многих случаях наблюдается пропорциональность

скорости резки V и отношения мощности лазерного излучения W к толщине разрезаемого материала h [2–4, 8]:

$$V \propto \frac{W}{h}. \quad (1)$$

Выражая скорость из очевидной зависимости $l = Vt$, где l – перемещение луча в направлении реза, а t – время, и переходя от пропорциональности к равенству, запишем уравнение (1) в виде

$$\frac{W}{h \cdot V} = \frac{W \cdot t}{h \cdot l} = \frac{E}{\Delta S} = q, \quad (2)$$

где $E = W \cdot t$ – энергия лазерного излучения;

$\Delta S = h \cdot l$ – площадь поверхности реза, на которую приходится эта энергия;

q – константа для данных параметров лазерного излучения и данного материала, зависящая от его физических свойств (плотности, температуры плавления, удельных энергий плавления и испарения) [2].

Определяемый уравнением (2) параметр $q = \frac{W}{h \cdot V}$, который имеет физический смысл энергии лазерного излучения, приходящейся на единичную площадку поверхности реза, может служить мерой эффективности процесса лазерной резки при сравнении различных технологических схем [8].

Качество лазерной резки определяется рядом показателей: точностью, шероховатостью, неперпендикулярностью (клиновидностью), размером зоны термического влияния, шириной реза, количеством грата, радиусом оплавления верхней кромки и др. [4]. Основными показателями качества лазерной резки принято считать шероховатость поверхности и наличие грата. Это связано в первую очередь с тем, что при минимальном значении указанных параметров другие показатели качества реза имеют допустимые значения. Поэтому получение лазерного реза с минимальной шероховатостью и отсутствием грата в нижней части образца представляет практический интерес.

Цель настоящей работы – выявление оптимального значения комплексного энергетического параметра q лазерной резки биметаллического материала по критерию качества реза – минимальной шероховатости поверхности реза.

МАТЕРИАЛЫ И ПАРАМЕТРЫ ЛАЗЕРНОЙ РЕЗКИ

На заготовки из среднеуглеродистой низколегированной стали 30ХГСА (ГОСТ 4543-71) дугой прямого действия на постоянном токе обратной полярности в защитной среде аргона осуществляли одноваликовую наплавку порошковой проволокой, по химическому составу близкой к быстрорежущей стали Р9М4К8 (ГОСТ 19265-73). Наплавку выполняли на следующих режимах:

сила тока 180...190 А;

напряжение 21...22 В;

скорость 12 м/ч.

После наплавки заготовки подвергали низкотемпературному отпуску при 200 °С с выдержкой 1 ч для снижения уровня остаточных напряжений, предотвращения образования холодных трещин. Затем полученные заготовки разрезали вдоль

наплавленного валика с помощью лазерной резки на комплексе BySprint 3015 на различных режимах. Мощность лазерного излучения $W = 2,7 \dots 4,4$ кВт. Скорость лазерной резки $V = 800 \dots 1500$ м/мин. В качестве вспомогательного газа использовался азот, давление которого составляло $1,4 \dots 1,5$ МПа. Толщина исследуемых образцов равнялась 4,4 и 5,5 мм. Комплексный энергетический параметр $q = 37 \dots 60$ Дж/мм².

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

В качестве параметра, характеризующего шероховатость поверхности реза, была принята средняя высота профиля $Rz5$ (ГОСТ Р ИСО 9013-2022 «Резка термическая. Классификация резов. Геометрические характеристики изделий и допуски по качеству»), которая рассчитывается как максимальная высота профиля в пределах базовой длины l_r с последующим усреднением в пределах длины оценки $l_n = 5l_r$. Параметр $Rz5$ аналогичен параметру Rz по более универсальному отечественному стандарту ГОСТ Р ИСО 4287-2014 с той разницей, что в первом случае отношение длины оценки к базовой длине $l_n / l_r = 5$ обязательное, а во втором лишь рекомендуемое. Параметр $Rz5$ поверхностей лазерных резов образцов определяли по профилограммам, полученным на различных расстояниях от верхней кромки реза. Шероховатость у верхней кромки и в средней части поверхности реза соответствовала наплавленной быстрорежущей стали, у нижней кромки поверхности реза – подложке из среднеуглеродистой низколегированной стали.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Особенность лазерного реза заключается в образовании характерной шероховатости поверхности, которая проявляется в виде периодических бороздок (бороздчатости) с волнообразными выпуклостями и впадинами (рис. 1). Разные авторы дают различные названия подобным шероховатостям (англ. *striations, strokes, patterns, ripples* и др.). Исследованию свойств поверхности лазерного реза посвящено большое количество теоретических и экспериментальных работ, например [8–10]. При резке биметаллического образца с продувкой азотом бороздчатость может возникать из-за гидродинамической нестабильности слоя расплава, обусловленной силовым воздействием струи газа на расплав.

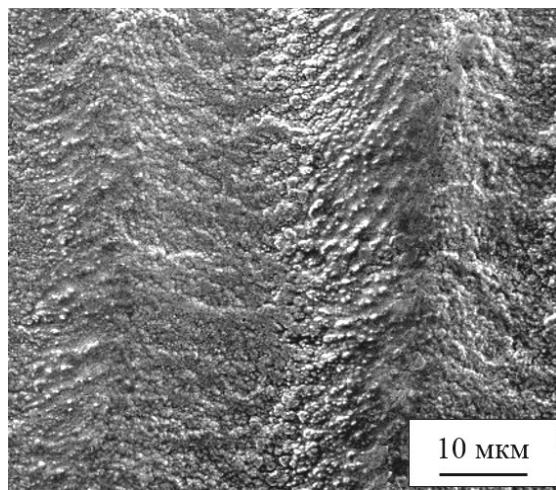


Рис. 1. Изображение участка поверхности лазерного реза образца

Бороздчатая структура на поверхности лазерного реза играет роль концентраторов напряжений и влияет на усталостную прочность материала. Для минимизации шероховатости поверхности реза необходимо проводить разделение материала на стационарном режиме, когда жидкая ванна расплава расположена по всей длине канала реза и скорости плавления металла в направлении реза и удаления расплавленного металла в каждом сечении канала равны [4]. Важно понимать, как энергетические параметры влияют на качество резки. Результаты выполненного анализа приведены ниже.

Изменение по глубине реза шероховатости образцов, полученных резкой на различных режимах, представлено на рис. 2, где x – расстояние от верхней кромки реза. Ось ординат направлена от верхней кромки образца к нижней. Из анализа изменения шероховатости по глубине реза можно заключить, что при двух режимах ($q = 44 \text{ Дж/мм}^2$ и $q = 50 \text{ Дж/мм}^2$) шероховатость практически постоянна, средние значения $Rz5$ составляют 13 и 21 мкм. При других режимах распределение шероховатости по глубине реза неравномерное, в разных областях поверхности одного реза различие параметра $Rz5$ достигает до 2 раз. В таком случае для характеристики шероховатости поверхностей реза необходимо использовать средние по всей глубине значения $Rz5$ [6].

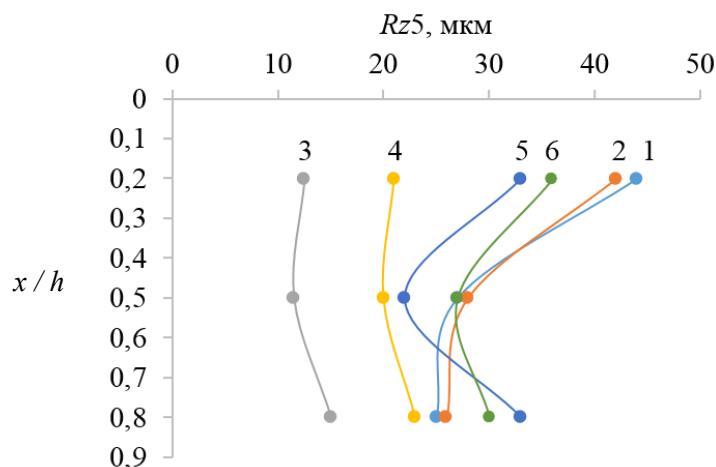


Рис. 2. Распределение шероховатости поверхности реза по толщине образцов:
 1 – $q = 37 \text{ Дж/мм}^2$; 2 – $q = 38 \text{ Дж/мм}^2$; 3 – $q = 44 \text{ Дж/мм}^2$; 4 – $q = 50 \text{ Дж/мм}^2$;
 5 – $q = 57 \text{ Дж/мм}^2$; 6 – $q = 60 \text{ Дж/мм}^2$

Величины параметра шероховатости $Rz5$ исследованных поверхностей в зависимости от комплексного энергетического параметра q представлены на рис. 3, средние значения по трем областям со среднеквадратичным отклонением – на рис. 3(б).

Сравнение высотного параметра шероховатости поверхности реза $Rz5$ при различных технологических режимах лазерной резки (рис. 3) наглядно свидетельствует о существенном влиянии этих режимов на качество поверхности реза. Характер зависимости $Rz5(q)$ аналогичен для всех областей поверхности реза с минимумом $Rz5 = 12\ldots15 \text{ мкм}$ при $q \approx 45 \text{ Дж/мм}^2$. Аналогичная экспериментальная зависимость в безразмерных координатах описана в работе [5], где для образцов низкоуглеродистой стали толщиной 5…10 мм при оптимальных условиях лазерной резки (с использованием технологического газа кислорода) получена минимальная без-

размерная шероховатость $Rz / h = (1,7 \dots 2,3) \cdot 10^{-3}$. В наших исследованиях оптимальных условий лазерной резки биметаллического материала минимальная безразмерная шероховатость $Rz5 / h$ лежит в интервале $(2,6 \dots 3,0) \cdot 10^{-3}$, что практически совпадает с вышеуказанным интервалом. При их сравнении надо учесть, что в 2009 году, когда была опубликована работа [5], параметр шероховатости Rz определялся как высота неровностей профиля шероховатости по десяти точкам и его значения примерно на 25 % меньше, чем значения параметра $Rz5$ для той же поверхности.

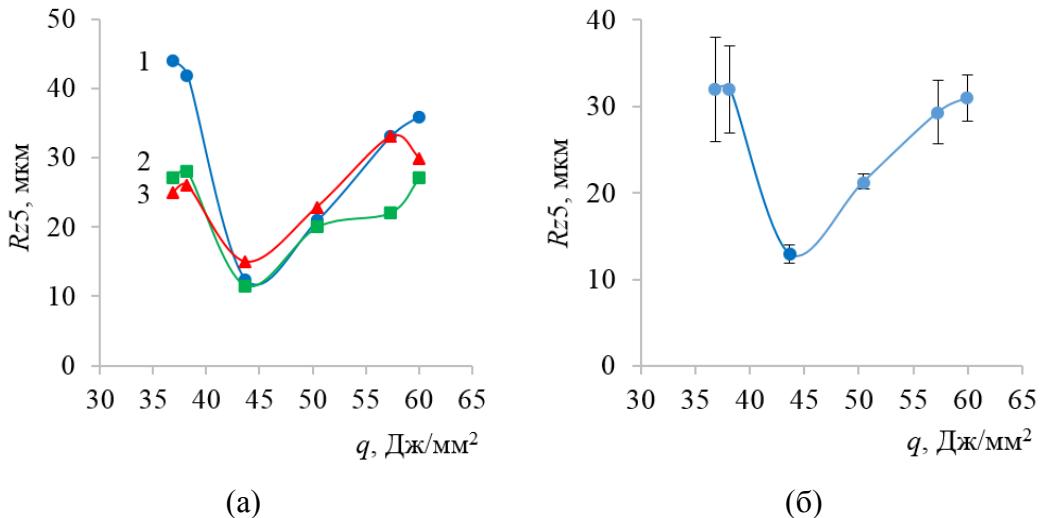


Рис. 3. Зависимость шероховатости поверхности реза от комплексного энергетического параметра лазерной резки: в трех областях поверхности реза (а):
1 – наплавка; 2 – переходная зона; 3 – подложка;
усредненная по трем областям поверхности реза (б)

Для полноты анализа результатов исследования целесообразно сравнить шероховатость поверхности реза после лазерной резки с аналогичными значениями поверхности реза после других способов разделения материала (таблица).

Шероховатость поверхности реза

Способ разделения	Среднее арифметическое отклонение профиля Ra , $\mu\text{мм}$						
	50	25	12,5	6,3	3,2	1,6	0,8
Кислородная резка	○	●	○				
Механическая резка	○	●	●	●	○		
Электроэррозионная резка			○	●	●	●	○
Лазерная резка			□	■	■	□	

Примечание. Темные значки – типичные значения параметра Ra , светлые – возможные значения; ●, ○ – литературные данные; ■, □ – данные авторов статьи.

Сравнение проводилось по значениям параметра Ra , так как именно они в основном приводятся в литературе [11]. Как видно из данных таблицы, качество поверхности реза по критерию шероховатости после газолазерной резки не уступает

качеству поверхности после механической резки (и даже превосходит его) и существенно выше, чем после кислородной резки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В соответствии с поставленной целью экспериментально показано существенное влияние комплексного энергетического параметра лазерной резки q на качество поверхности реза биметаллического материала по критерию шероховатости. Параметр q имеет физический смысл энергии лазерного излучения в расчете на единицу площади поверхности реза и может использоваться для сравнения и выбора оптимальных режимов лазерной резки, таких как мощность излучения и скорость резки. Для исследованного двухслойного материала толщиной 5,5 мм, состоящего из наплавленной быстрорежущей стали на подложке конструкционной средненуглеродистой низколегированной стали, минимальная шероховатость поверхности реза получена при $q \approx 45 \text{ Дж/мм}^2$ и характеризуется значениями параметра $Rz5$ в диапазоне 12...15 мкм.

ЛИТЕРАТУРА

1. Alsaadawy M., Dewidar M., Said A., Maher I., Shehabeldeen T.A. A comprehensive review of studying the influence of laser cutting parameters on surface and kerf quality of metals // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2024. V. 130. № 3. P. 1039–1074.
2. Steen W. M. *Laser Material Processing*. London: Springer–Verlag, 2003. 408 p.
3. LIA Handbook of Laser Materials Processing / Ed. J.F. Ready. Orlando: Laser Institute of America; Magnolia Publ. Inc., 2001. 716 p.
4. Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Мисюров А.И. Технологические процессы лазерной сварки, резки и размерной обработки. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2024. 376 с.
5. Фомин В.М., Маликов А.Г., Оришич А.М., Шулятьев В.Б. О законах подобия газолазерной резки толстых стальных листов // *Доклады академии наук*. 2009. Т. 428. № 3. С. 325–329.
6. Минаев И.В., Хонелидзе Д.М., Голышев И.В. Оптимизация технологических параметров газолазерной резки за счет их приведения к безразмерным величинам // *Технолого-экономическое образование: достижения, инновации, перспективы: Межвузовский сборник статей*. Тула: ТГПУ им. Л.Н. Толстого, 2015. С. 77–81.
7. Фомин В.М., Голышев А.А., Маликов А.Г., Оришич А.М., Шулятьев В.Б. Механические характеристики высококачественной лазерной резки стали волоконным и CO_2 -лазерами // *Прикладная механика и техническая физика*. 2015. Т. 56. № 4 (332). С. 215–225.
8. Black I. A Comparison of Severance Energies for Reactive CO_2 Laser Cutting of Mild Steel // *International Journal of Advanced Manufacturing Technologies*. 1999. V. 15. № 11. P. 832–834.
9. Барчуков Д.А., Смолякова И.А., Афанасьева Л.Е. Влияние технологических параметров лазерной резки на размер зоны лазерного воздействия // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2024. № 4 (24). С. 22–28.
10. Измайлов В.В., Афанасьева Л.Е., Новоселова М.В. О фрикционных характеристиках поверхности газолазерного реза быстрорежущей стали Р6М5 // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. № 3 (27), 2025

ник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2022. № 1 (13). С. 5–13.

11. Уайтхауз Д. Метрология поверхностей. Принципы, промышленные методы и приборы. Долгопрудный: Издательский Дом «Интеллект», 2009. 472 с.

Для цитирования: Измайлов В.В., Новоселова М.В., Афанасьева Л.Е. Оптимизация энергетического режима лазерной резки биметаллического материала по критерию минимума шероховатости // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2025. № 3 (27). С. 42–48.

OPTIMIZATION OF THE ENERGY MODE OF LASER CUTTING OF BIMETALLIC MATERIAL BY THE CRITERION OF MINIMUM ROUGHNESS

V.V. IZMAILOV, Dr. Sc., M.V. NOVOSELOVA, Cand. Sc.,
L.E. AFANASIEVA, Cand. Sc.

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

The article is devoted to the study of the influence of laser cutting parameters on the quality of the cut surface. The object of the study is a bimetallic material, which is high-speed steel deposited on a structural steel substrate. The roughness parameter $Rz5$ according to GOST R ISO 9013-2022 serves as the cut surface quality criterion, and the complex parameter q , which has the physical meaning of the laser radiation energy per unit area of the cut surface, serves as a characteristic of the cutting modes. A non-uniform distribution of the parameter $Rz5$ over the cut surface is revealed, which is illustrated by the graphical dependencies $Rz5(x / h)$, where x is the distance from the upper edge of the cut, h is the thickness of the cut sample. Optimum values of the complex energy parameter q for this bimetallic material, providing minimum roughness values, are experimentally determined.

Keywords: laser cutting, energy parameters, surface roughness, deposition, high-speed steel, bimetal.

Поступила в редакцию/received: 07.04.2025; после рецензирования/revised: 12.04.2025;
принята/accepted: 25.04.2025

НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ И ГОРНЫЕ НАУКИ

УДК 622.331.002.5

О ВЫБОРЕ ПРОДОЛЬНОЙ БАЗЫ ПРИЦЕПНОЙ ТОРФЯНОЙ ПРОФИЛИРУЮЩЕЙ МАШИНЫ

А.Л. ЯБЛОНЕВ, д-р техн. наук

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

© Яблонев А.Л., 2025

Рельеф поверхности торфяных картовых полей оказывает одно из решающих воздействий на технологические показатели добычи фрезерного торфа. Поддерживать поверхности карт в надлежащем состоянии можно не только с помощью регулярного перепрофилирования большими шнековыми профилировщиками-планировщиками (что, по сути, является весьма энергозатратной операцией), но и систематическим использованием технологического добычного оборудования с профилирующими свойствами. Важнейшим параметром таких прицепных профилирующих машин является продольная база. В статье приведена методика по выбору продольной колесной базы прицепной торфяной профилирующей машины в зависимости от фактических параметров рельефа (амплитуды и шага колебаний) при сведении профилей поверхностей карт к усредненным детерминированным функциям.

Ключевые слова: картовое поле, рельеф поверхности, копирование, профилирование, радиус неровности, добывающий фрезер, профилировщик-планировщик.

DOI: 10.46573/2658-5030-2025-3-49-59

ВВЕДЕНИЕ

Профиль поверхности картовых полей, определяемый качеством их подготовки и содержания, оказывает одно из решающих воздействий на процесс экскавации фрезерного торфа из залежи [1]. Даже хорошо подготовленная поверхность, но не получившая должного ухода (содержания), выражающегося в своевременном профилировании, подрезании кромок (бровок), планировке, не позволит достичь высоких технологических показателей [2], после чего может быть принято ошибочное решение о нерентабельности торфяного производства в России [3].

При разработке систем автоматического регулирования и определении динамических нагрузок на рабочие органы и ходовые устройства торфяных машин важнейшей исходной информацией являются данные об изменении профилей поверхности полей [4].

На отклонение профилей поверхности полей от первоначально подготовленного состояния в процессе эксплуатации влияют следующие факторы:

1. Деформация торфяной залежи вследствие движения машин. Известно, что с глубиной деформация затухает и на полуметровом расстоянии составляет лишь 22 % от деформации на поверхности [5].

2. Наличие древесных включений, из-за которых фрезерующий агрегат оставляет участки несфрезерованной залежи (при подбрасывании фрезы) или образует выбоины (при выдергивании фрезой корней и других древесных включений).

3. Неравномерное снятие слоев торфяной залежи по толщине рабочими органами технологического оборудования из-за вариации влажности [6, 7].

4. Тип добывающего фрезера, обрабатывающего залежь. При использовании фрезеров копирующего типа (с длиной неразрезной секции менее 2 м) на залежи со временем наблюдается рост размеров неровностей, так как в более влажных впадинах фреза снимает гораздо больший слой торфа, чем на сухих местах. Фрезеры профилирующего типа (с длиной неразрезной секции более 2 м) сглаживают неровности, но обладают меньшей способностью вписываться в рельеф [7]. Очевидно, что оптимальная конструкция фрезера должна и копировать рельеф и профилировать его. Экспериментальные исследования, проведенные на Емельяновском торфопредприятии, показали, что лучшей копирующей способностью обладают фрезеры типа ЛОФ, МТФ-18 (ФОР), МТФ-19 с шириной неразрезной секции 1,31–1,595 м. Наилучшие профилирующие свойства отмечены у фрезеров Ф-9,5Б и Ф-9,5Р с шириной неразрезной секции 3–4,5 м [8].

5. Эффект «растаскивания» по поверхности карты влажного торфа из уже имеющихся неровностей ходовыми устройствами машин [9].

6. Образование «бровок» на краях картовых полей на приканальных полосах, которые удаляются специальными бровкорезами (профилировщиками краев) [10, 11].

Все перечисленные причины в той или иной степени носят характер случайных процессов. Анализ позволяет сделать вывод, что образование бровок сравнительно легко преодолевается периодическим профилированием краев. Что же касается других факторов, то единственным из них, которым можно управлять и поддерживать поверхности картовых полей в относительно ровном, близком к заданному, состоянии, является геометрическая ширина неразрезной секции фрезера, который может иметь как копирующие, так и профилирующие свойства.

Однако есть еще один параметр, управляя которым можно добиться относительно ровного рельефа при систематической обработке карт фрезерами и другим профилирующим технологическим оборудованием. Это продольная база (расстояние между передними и задними опорными устройствами) прицепных торфяных машин. В сочетании с оптимальным местом расположения рабочего органа между передними и задними опорными устройствами величина продольной базы значительно влияет на размер неровностей, выравнивая их. Поэтому цель данной статьи – математически описать взаимосвязь геометрических характеристик неровностей и продольной базы обрабатывающего технологического оборудования, с помощью которой данные неровности могут быть ликвидированы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Вопрос о месте расположения ходовых устройств и рабочих органов торфяных машин на протяжении десятилетий изучался многими учеными. Так, например, в работе [12] обосновывается рациональное размещение опорных катков на раме торфяной машины. Авторы приходят к выводу, что задача размещения опорных катков должна подчиняться условию о том, что дисперсия равнодействующей динамических нагрузок от всех катков должна быть минимальной. С помощью векторного

представления гармонических колебаний были рассмотрены индивидуальная (независимая) и балансирная подвески, для которых математически получено, а затем экспериментально проверено вычисленное рациональное расстояние между опорными катками.

В работе [13] рассмотрены принципиальные схемы навесного, полунавесного траншеекопателя и аналогичной машины с «плавающей» подвеской. Отмечено, что для создания наиболее простой и дешевой машины можно воспользоваться принципами конструирования навесных или полунавесных машин. Если же стоит задача стабилизации глубины резания с признаком процессу элементов профилирования, то навесные и полунавесные машины будут просто копировать и даже усугублять неровности рельефа. Хорошие результаты в данном случае могут быть получены при использовании прицепных машин и машин, у которых рабочий орган располагается на плавающей подвеске. По компоновке последние очень схожи с прицепными, рабочий орган у них располагается между передним и задним опорным устройством, но, регулируя усилие прижатия рабочего органа к обрабатываемой поверхности, можно добиться минимальной дисперсии глубины резания.

В работе [14] получена математическая модель, описывающая дисперсию глубины фрезерования с позиции представления о том, что профили поверхности торфяных карт имеют нерегулярный (случайный) характер. Ее исследование на экстремум показало, что дисперсия принимает минимальное значение при одинаковом расстоянии от оси рабочего органа (добывающей фрезы) до передней и до задней опоры, т.е. при срединном расположении рабочего органа.

Большое количество работ посвящено и описанию профилей поверхности (неровностей) торфяных карт.

Например, А.В. Тимофеев оценивал продольный рельеф показателем неровности n [6]:

$$n = \frac{h_b + h_v}{2L},$$

где h_b и h_v – высоты бугра и впадины, соответственно;

L – расстояние между центрами вписанных окружностей в бугор и впадину.

Таким образом, продольный рельеф исследователь представляет в виде отрезков сопрягающихся синусоид. Поперечный рельеф оценивался им по распределению радиусов кривизны рельефа на 4–5-метровых отрезках поперечных ходов. А.В. Тимофеев приводит распределение показателей неровности для торфяных залежей верхового и низинного типов, полученных на основании экспериментального материала [6].

Н.А. Кот и Н.И. Бохан рассматривают изменение отметок профилей поверхности карты как случайный процесс, обладающий свойством эргодичности [7]. Путем корреляционного и спектрального анализа профилограмм поверхностей карт авторы установили, что нормированные корреляционные функции профилей поверхности подготовленных и находящихся в эксплуатации полей аппроксимируются уравнениями:

$$\rho_{\text{под}}(l) = e^{-0,25|l|},$$

$$\rho_{\text{экспл}}(l) = e^{-0,4|l|},$$

где l – координата отметки поверхности.

При описании распределения ординат профилей поверхности картовых полей нормальным законом были получены величины среднего квадратичного отклонения отметок от нулевой линии: $\sigma_{\text{под}} = 0,028$ м, $\sigma_{\text{экспл}} = 0,04$ м [15].

Н.В. Кузнецов подчеркивает, что рельеф поверхностей картовых полей можно описать как случайной, так и некой усредненной, детерминированной функцией [7]. Обобщение автором ряда работ, связанных с исследованием рельефа поверхности торфяных карт, показало, что нормированную корреляционную функцию большинства процессов изменения отметок поверхностей можно описать законом

$$\rho(l) = e^{-\alpha|l|} \cos \beta l,$$

где α и β – параметры корреляционной функции, отличающиеся для продольных и поперечных профилей [7].

Усредненная детерминированная функция, которой можно описать рельеф поверхности карт, представлена Н.В. Кузнецовым в виде

$$Y_{\text{п}} = A \left[\sin \left(l - \frac{\pi}{2} \right) + 1 \right],$$

где $Y_{\text{п}}$ – отметка ординаты профиля поверхности карты;

A – амплитуда колебаний отметок профилей поверхности относительно нулевой линии.

Установить какую-либо зависимость изменения характеристик рельефа от свойств торфяной залежи Н.В. Кузнецова не удалось, поэтому им был сделан вывод о том, что основную роль в формировании профилей поверхностей картовых полей играет способ подготовки и содержания карт, а не качественные характеристики торфяной залежи.

В.Г. Селеннов по отфильтрованным профилограммам поверхностей картовых полей на залежи верхового типа низкой степени разложения (5...15 %) построил корреляционные функции, затухание корреляционной связи в которых наблюдалось через 6...11 м, причем характер протекания процесса доказывал наличие скрытой периодической составляющей [16], что, собственно, совпадает с выводами Н.В. Кузнецова.

В.К. Куприянов, обследовав около 18 000 м профилей поверхности карт, пришел к выводу, что распределение длин бугров L_b и впадин $L_{\text{вп}}$, а также высот бугров h_b и глубин впадин $h_{\text{вп}}$ может быть описано законом Вейбулла, широко применяемым в теории надежности. На основе изучения работы валкователя В.К. Куприянов по допустимым потерям торфа (5...10 %) нашел максимально допустимые размеры неровностей: $h_{\text{доп}} = 0,65$ м; $L_{\text{доп}} = 4$ м. Причем для эффективной работы необходимо соблюдение условия $\frac{h}{L} \leq 0,163$, а для выравнивания площадки с неровностями по величине $|h| \geq 0,25$ м следует первоначально осуществить вертикальную планировку бульдозером, в противном случае работа профилировщика окажется малоэффективной [7].

Анализ литературы показал, что поперечные профили рассматривались исследователями, как правило, в отрыве от продольных, в результате чего отсутствовала цельная картина изменения отметок профилей поверхностей картовых полей в зависимости от координат.

Проведенная в полевых условиях экспериментальная часть исследования [17] по оценке рельефа достаточно ровной опытной площадки на месторождении верхового торфа степенью разложения $R = 15\dots20\%$ после операции профилирования и двух циклов добычи фрезерного торфа позволила выявить следующие характеристики рельефа:

средняя амплитуда колебаний отметок профилей поверхности в продольной и поперечной плоскостях $A = 0,048$ м;

среднее квадратичное отклонение от математического ожидания отметок продольных и поперечных профилей, соответственно: $\sigma_{\text{прод}} = 0,0513$ м, $\sigma_{\text{поп}} = 0,0444$ м;

коэффициент вариации отметок для продольных и поперечных профилей, соответственно: $k_{\text{в прод}} = 0,32$, $k_{\text{в поп}} = 0,28$ (значения близки к критическому значению $k_{\text{в крит}} = 0,33$, при достижении которого, как правило, принимается решение об обработке случайной функции не нормальным законом распределения, а законом Вейбулла);

средний шаг расположения неровностей (длина волны) в детерминированной функции для продольных и поперечных профилей, соответственно: $T_{\text{прод}} = 9,0$ м, $T_{\text{поп}} = 4,8$ м.

В ходе обработки опытных данных было отмечено, что в процессах изменения отметок профилей поверхностей карты как в продольном, так и в поперечном направлении гармоническая составляющая выражена столь же сильно, сколь и случайная. Поэтому совершенно правомерно описывать колебания отметок профилей детерминированными функциями. Более того, дополнение гармонической синусоидальной функции параметром шага сдвига фазы колебаний позволило свести воедино и продольные, и поперечные профили, создав усредненную модель поверхности карты [18, 19], а уравнения, описывающие изменение отметок профилей в продольном и поперечном направлениях, получили вид:

$$Z = A \sin \left(\frac{2\pi X}{T_{\text{прод}}} + \varphi \right), \quad (1)$$

$$Z = A \sin \left(\frac{2\pi Y}{T_{\text{поп}}} + \varphi \right), \quad (2)$$

где Z – ордината отметки профилей поверхности карты;

X и Y – соответствующие координаты точки в продольном и поперечном направлениях;

φ – угол сдвига фазы колебаний (в работах обоснован шаг сдвига фазы колебаний $\Delta\varphi = 30^\circ$).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Рассмотрим случай обработки поверхности торфяного карточного поля с неровностью радиусом R неким профилирующим устройством (это может быть и профилирующий фрезер, и планировщик, и др.), рабочий орган которого размещен посередине между передними и задними опорными устройствами (колесами) радиусом r (рис. 1).

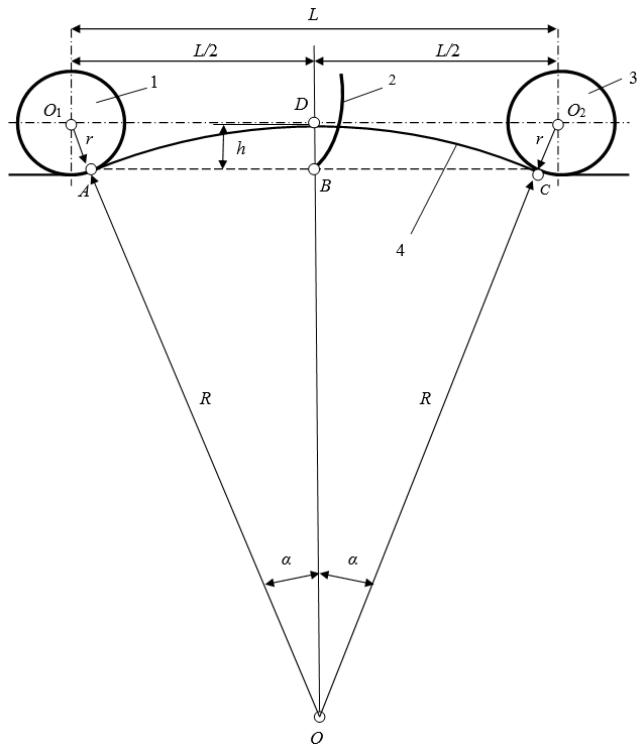


Рис. 1. Схема к определению зависимости глубины резания h от продольной базы L двухосного планировщика-профилировщика:

- 1 – переднее колесо; 2 – рабочий орган (в том числе отвал);
- 3 – заднее колесо; 4 – продольный профиль поверхности

Из рисунка видно, что максимальная глубина резания h определяется радиусом продольного профиля R и углом α :

$$h = R - R \cos \alpha. \quad (3)$$

Поскольку угол α является постоянно изменяющимся неизвестным, найдем его, используя теорему синусов для равных треугольников OO_1D и OO_2D :

$$\frac{R+r}{\sin 90^\circ} = \frac{0,5L}{\sin \alpha}, \quad (4)$$

откуда

$$\sin \alpha = \frac{0,5L}{R+r} = \frac{L}{2(R+r)}. \quad (5)$$

Подстановкой выражения (5) в формулу (3) получим:

$$h = R - R \cos \arcsin \frac{L}{2(R+r)} = R \left(1 - \cos \arcsin \frac{L}{2(R+r)} \right). \quad (6)$$

Данная математическая модель является искомой, связывающей глубину резания h (по сути, высоту бугра неровности), продольную базу машины L , продольный радиус поверхности R и радиус колес машины r .

Однако на практике чаще встречаются обратные задачи, когда нужно определить продольную базу машины L , зная радиус продольного профиля R , радиус колеса r и максимальную глубину резания h .

Для решения такой задачи найдем из формулы (3) $\cos\alpha$:

$$\cos\alpha = \frac{R-h}{R}. \quad (7)$$

Продольную базу найдем из теоремы Пифагора для треугольника OO_1D :

$$\frac{L}{2} = \sqrt{(R+r)^2 - [(R+r)\cos\alpha]^2}, \quad (8)$$

следовательно,

$$L = 2\sqrt{(R+r)^2 - [(R+r)\cos\alpha]^2}. \quad (9)$$

Подставив выражение (7) в формулу (9), получим:

$$L = 2\sqrt{(R+r)^2 - \left[(R+r)\left(\frac{R-h}{R}\right)\right]^2}. \quad (10)$$

Раскрытие скобок в полученном выражении не имеет смысла, поскольку это усложнит все выражение. Следовательно, выражение (10) и есть окончательная математическая модель, позволяющая определить продольную базу машины по радиусу продольного профиля, радиусу колеса и максимальной глубине резания.

Поскольку полученные математические модели (6) и (10) выражают показанную на рис. 1 одну и ту же зависимость между переменными R , r , h и L , проверить верность обеих моделей можно, задавшись конкретными числовыми характеристиками. Пусть, например, $R = 6$ м, $r = 0,5$ м, $L = 4$ м. Требуется определить h по формуле (6):

$$h = R \left(1 - \cos \arcsin \frac{L}{2(R+r)}\right) = 6 \left(1 - \cos \arcsin \frac{4}{2(6+0,5)}\right) = 0,291\,084\,517 \text{ м.}$$

Теперь, если обе модели истинны, то, подставив в (10) $h = 0,291\,084\,517$ м, мы должны получить $L \approx 4$ м:

$$L = 2\sqrt{(R+r)^2 - \left[(R+r)\left(\frac{R-h}{R}\right)\right]^2} = 2\sqrt{(6+0,5)^2 - \left[(6+0,5)\left(\frac{6-0,291084517}{6}\right)\right]^2} = 4 \text{ м.}$$

Следовательно, математические модели (6) и (10) верны.

При описании профилей поверхности картовых полей детерминированными функциями вида (1) и (2) и знании таких параметров, как амплитуда колебаний A и длина волны $T_{\text{прод}}$, можно для конкретного случая определить оптимальную базу профилирующего устройства, которое успешно выравнивало бы неровности. Для этого в детерминированную функцию (синусоиду) вписывается окружность, радиус которой является радиусом неровности (рис. 2), после чего последний находится исходя из следующих соображений.

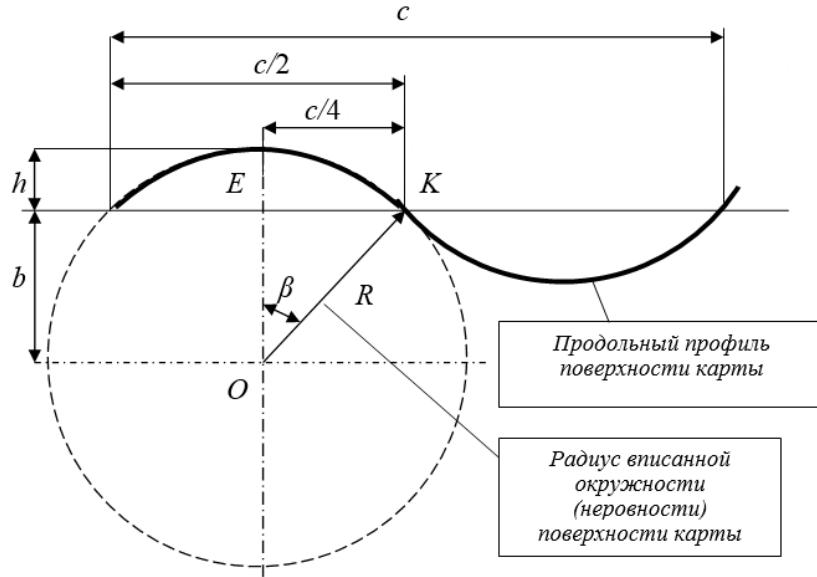


Рис. 2. К расчету среднего радиуса продольной неровности картового поля

Рассматривая прямоугольный треугольник OEK , можно увидеть, что

$$\left(\frac{c}{4}\right)^2 + b^2 = R^2, \quad (11)$$

где $b = R - h$ [20]. Подставив b в выражение (11), получим:

$$\left(\frac{c}{4}\right)^2 + (R - h)^2 = R^2,$$

или, раскрыв скобки:

$$\begin{aligned} \frac{c^2}{16} + R^2 - 2Rh + h^2 &= R^2, \\ \frac{c^2}{16} - 2Rh + h^2 &= 0, \\ R &= \frac{\frac{c^2}{16} + h^2}{2h}. \end{aligned}$$

Полагая, что длина волны $T_{\text{прод}} = c$, а амплитуда колебаний $A = h$, получим окончательную формулу для оценки среднего радиуса продольных неровностей:

$$R = \frac{\frac{T_{\text{прод}}^2}{16} + A^2}{2A}. \quad (12)$$

Рассчитав по формуле (12) средний радиус продольных неровностей и воспользовавшись формулой (10), можно определить оптимальную базу прицепной профилирующей машины, которая будет успешно выравнивать все среднестатистические неровности на картовом поле. Единственным вопросом, который остается неосвещенным, является радиус колеса прицепной профилирующей машины. Он принимается исходя из параметров техники, имеющейся в наличии. Например, для

выпускаемого в настоящее время ООО «Гринмаш» (г. Тверь) фрезера БФТ-9 радиус колес составляет 0,3…0,435 м [21].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обоснована методика выбора оптимальной продольной базы прицепной торфяной профилирующей машины, в качестве входных (начальных) параметров в которой выступают статистические характеристики профиля поверхности картовых полей при сведении их к детерминированным функциям (амплитуде колебаний и длине волны) и радиус колес прицепной машины. Показано, что обрабатывающая прицепная машина, имеющая такую продольную базу, способна производить качественное профилирование и выравнивать среднестатистические неровности рельефа, благодаря чему полное перепрофилирование картовых полей шнековым профилировщиком может производиться реже.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ларгин И.Ф., Корчунов С.С., Малков Л.М., Оленин А.С., Лазарев А.В.. Справочник по торфу / под ред. А.В. Лазарева, С.С. Корчунова. М: Недра, 1982. 760 с.
2. Misnikov O. Basic Technologies and Equipment Used for Peat Deposits Development in Foreign Countries // E3S Web of Conferences. EDP Sciences, 2018. V. 41. P. 01046.
3. Панов В.В., Мисников О.С., Купорова А.В. Проблемы и перспективы развития торфяного производства в Российской Федерации // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2017. № 5. С.105–117.
4. Караваева Н.М. Автоматическое регулирование и динамика энергомеханических структур торфяных машин. М.: Недра, 1975. 255 с.
5. Амарян Л.С. Свойства слабых грунтов и методы их изучения. М.: Недра, 1990. 220 с.
6. Тимофеев А.В. Теоретическое и экспериментальное исследование процесса фрезерования торфяной залежи и формирования расстила: дис. ... канд. техн. наук. Калинин: КПИ, 1966. 278 с.
7. Кузнецов Н.В. Исследование влияния работы фрезеров, копирующего и профилирующего типов на рельеф поверхности торфяной залежи и формирование расстила: дис. ... канд. техн. наук. Ленинград, 1979. 190 с.
8. Самсонов Л.Н. Фрезерование торфяной залежи. М.: Недра, 1985. 211 с.
9. Куприянов В.К. Влияние элементов рельефа поверхности производственных площадей на технологические показатели добычи фрезерного торфа и совершенствование средств механизации планировки: дис. ... канд. техн. наук. Калинин: КПИ, 1985. 201 с.
10. Яблонев А.Л., Жуков Н.М. Экспериментальное обоснование угла установки фрезы торфяного бровкореза // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2023. № 2 (18). С. 21–30.
11. Яблонев А.Л. Оптимизация угла установки фрезы торфяного бровкореза с позиции энергоемкости фрезерования // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2024. № 2 (22). С. 44–55.
12. Ануфриев Г.П., Либик В.К. О рациональном размещении опорных катков на раме машины // Производство и комплексное использование торфа в народном хозяйстве: Труды Всесоюзного научно-исследовательского института торфяной промышленности». Л.: ВНИИТП, 1980. Вып. 44. С. 48–54.

13. Солопов С.Г., Коровицын Л.Ф. К вопросу о выборе места подвески рабочего органа в торфяных машинах // *Механизация процессов добычи и переработки торфа: Труды Калининского политехнического института*. М.: ЦНИИТ Эстроймаш, 1974. С. 83–87.
14. Синицын В.Ф. К вопросу о выборе продольной базы фрезера и размещении фрезы относительно опор // *Технология и комплексная механизация торфяного производства: Межвузовский сборник научных трудов*. Тверь: ТвГПИ, 1994. С. 65–72.
15. Кот Н.А., Бохан Н.И. Определение статистических характеристик профиля торфяных полей // *Торфяная промышленность*. 1971. № 9. С. 14–16.
16. Селеннов В.Г. Исследование взаимодействия гусеничных торфяных машин с осушенными залежами верхового типа: дис. ... канд. техн. наук. Калинин, 1976. 204 с.
17. Яблонев А.Л. Теоретическое и экспериментальное обоснование параметров и режимов моделирования работы фрезеров послойно-поверхностного фрезерования торфяной залежи: дис. ... канд. техн. наук. Тверь, 1993. 151 с.
18. Яблонев А.Л. Модель поверхности карточного поля // *Торфяная промышленность*. 1991. № 5. С. 13–16.
19. Яблонев А.Л. Модель поверхности карты в трехмерном пространстве // *Тезисы докладов Второй научно-технической конференции молодых ученых и специалистов ТвГПИ*. Тверь: ТвГПИ, 1991. С. 55–56.
20. Марамыгина Т.А., Гиль С.В., Белякова Е.И., Зеленый П.В. Геометрические построения: кривые линии, сопряжения: учебно-методическое пособие. Минск: БНТУ, 2009. 70 с.
21. Гринмаш. Техника для добычи торфа. URL: <https://grinmash.ru/peatdigging#!tp/509903103-1667556664165> (дата обращения: 23.02.2025).

Для цитирования: Яблонев А.Л. О выборе продольной базы прицепной торфяной профилирующей машины // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2025. № 3 (27). С. 49–59.

ABOUT THE CHOICE OF THE LONGITUDINAL BASE OF A TRAILER-TOWED PEAT PROFILING MACHINE

A.L. YABLONEV, Dr. Sc.

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

The surface relief of peat fields has one of the decisive effects on the technological parameters of milled peat extraction. It is possible to maintain the surfaces of the field in proper condition not only by regular re-profiling with large auger profilers-planners, which, in fact, is a very energy-intensive operation, but also by systematically using technological extraction equipment with profiling properties. The most important parameter of such trailed profiling machines is the longitudinal base. The article provides a method for selecting the longitudinal wheelbase of a trailed peat profiling machine depending on the actual parameters of the relief (amplitude and step of oscillations) when reducing the profiles of the surface of the bog to averaged deterministic functions.

Keywords: map field, surface relief, copying, profiling, unevenness radius, mining milling machine, profiler-planner.

Поступила в редакцию/received: 08.04.2025; после рецензирования/revised: 27.04.2025;
принята/accepted: 30.04.2025

УДК 622.331:556.56

МЕТОДОЛОГИЯ ИНВЕНТАРИЗАЦИИ ТОРФЯНОГО ФОНДА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ ГЕОТЕХНОЛОГИЙ И ЦЕЛЕЙ НАЦИОНАЛЬНОГО КАДАСТРА ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ

К.Л. ШАХМАТОВ¹, канд. техн. наук, Т.В. ОРЛОВ², канд. геол.-минерал. наук,
О.В. ПУХОВА¹, канд. техн. наук, М.В. АРХИПОВА², канд. географ. наук,
В.В. БОНДАРЬ², асп.

¹Тверской государственный технический университет,
170026, Тверь, наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: krl81@list.ru

²Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН,
101000, Москва, Уланский пер., 13, стр. 2, e-mail: tim.orlov@gmail.com

© Шахматов К.Л., Орлов Т.В., Пухова О.В.,
Архипова М.В., Бондарь В.В., 2025

В статье рассмотрены методологические подходы к инвентаризации современного состояния торфяных месторождений в целях уточнения площадей и состояния торфяников для Национального кадастра антропогенных выбросов парниковых газов, а также выбора участков для реализации на них климатических проектов по вторичному обводнению ранее осушенных торфяников. Предложена последовательность действий, а также материалы и методы для достижения обозначенных целей. Представлены результаты практического выполнения разработанного алгоритма на примере двух муниципальных образований Тюменской области.

Ключевые слова: торфяные болота, инвентаризация, осушенные торфяники, кадастр парниковых газов, климатический проект.

DOI: 10.46573/2658-5030-2025-3-59-70

ВВЕДЕНИЕ

Торфяные месторождения представляют высокий интерес со многих точек зрения [1, 2]. Исторически это территории, содержащие общераспространенное полезное ископаемое, традиционно используемое в качестве коммунально-бытового топлива и в сельском хозяйстве. Торфяная промышленность насчитывает более 100 лет, и в определенные исторические периоды торфяное топливо сыграло ключевую роль в энергетике страны [3]. Торфяные почвы активно используются в качестве плодородных земель, особенно в районах Западной Сибири и Дальнего Востока [4–7], развиваются технологии добычи торфа на Северо-Западе России [8], а также существуют перспективы использования торфяников в арктических и субарктических районах

России [9]. Однако в последние десятилетия добыча торфа существенно сократилась [10–12]. При этом на огромных территориях бывших торфоразработок не проводилось необходимых рекультивационных работ. Именно это обстоятельство определило их последующее состояние, при котором долгое время осушительная сеть продолжала функционировать, что, в свою очередь, обусловило сохранение пожароопасных условий. Более того, торф, являясь одним из самых значительных накопителей органического углерода, в осушенном состоянии подвержен активному биохимическому распаду (окислению, минерализации), что сопровождается выделением парниковых газов (ПГ), в первую очередь диоксида углерода и метана [13].

Российская Федерация ратифицировала рамочную Конвенцию ООН об изменении климата (РКИК ООН) 4 ноября 1994 г. (Российская Федерация, 1994). В 2004 г. Россия ратифицировала Киотский протокол к РКИК ООН (Российская Федерация, 2004). Российская Федерация является стороной РКИК ООН, входящей в приложение I, и стороной Киотского протокола, входящей в приложение «В». В соответствии со своими обязательствами по статьям 4 и 12 РКИК ООН, РФ разрабатывает, периодически (в настоящее время – ежегодно) обновляет, публикует и представляет Конференции Сторон через ее секретариат национальный кадастр антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями всех ПГ, не регулируемых Монреальским протоколом. Организационное руководство разработкой доклада осуществляется Федеральной службой по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет). Методическое руководство, оценки выбросов и абсорбции ПГ, подготовка и редактирование доклада выполняются Федеральным государственным бюджетным учреждением «Институт глобального климата и экологии имени академика Ю.А. Израэля (ФГБУ «ИГКЭ»). В рамках этого доклада выбросы ПГ от водно-болотных угодий, в том числе и торфяников, определяются в разделе «Землепользование, изменение в землепользовании и лесное хозяйство» (ЗИЗЛХ), где приводятся категории земель и угодья, по которым осуществляется государственный учет земельного фонда страны.

Сведения по площади торфоразработок доступны только для 1990, 1996, 1998–2007 гг. (Роснедвижимость, 1990, 1996, 2008а; письмо Росреестра от 12.02.2013 № 18-исх/01105-НА/13). Согласно информации Росреестра, после 2008 года в соответствии с постановлением Правительства РФ от 01.06.2009 № 457 не предусмотрен сбор сведений по площадям торфоразработок. Для периода с 1990 по 2008 гг. площадь торфоразработок, включая действующие и выработанные месторождения, принята равной 316,6 тыс. га. Данные по площадям торфоразработок с 2009–2022 гг. предоставлены Минэнерго России (Письмо № ПС-17680/11 от 29.11.2022). С 2009 по 2022 гг., согласно этим данным, общая площадь торфоразработок составила 325,2 тыс. га, включая действующие, выработанные и обводненные участки [14].

В работе [15] рассмотрена отраслевая информация по торфяным болотам России, история освоения, а также методы сбора и хранения данных, структура информации и условия доступа к ней.

Тем не менее фактическая ситуация может существенно отличаться от официальной [14, 16], что может значительно повлиять на итоговые выбросы ПГ от торфоразработок. Отмечается, что площади торфоразработок получены методом экстраполяции данных 2007 года, поэтому их неопределенность оценивается $\pm 50\%$ [14, 17].

Именно поэтому существует необходимость в более объективной оценке современного состояния бывших торфоразработок в период не позднее последних 2...3 лет на обширных территориях регионов Российской Федерации.

Выброс CO_2 рассчитывается в соответствии с методом Уровня 1 и коэффициентами, рекомендованными в дополнительном руководстве МГЭИК по водно-болотным угодьям (IPCC, 2013) [14]. Согласно представленным в нем рекомендациям, выбросы CO_2 при торфоразработках происходят непосредственно на территории осушения (EF_CO2_on-site), а также при вымывании органического материала (растворенное органическое вещество) (EF_CO2_DOC). Эти коэффициенты для торфоразработок в умеренной зоне составляют: EF_CO2_on-site = 2,8 т С/га/год; EF_CO2_DOC = 0,31 т С/га/год.

Выделяют несколько категорий земель в категории "wetlands" (водно-болотные угодья) с определенными коэффициентами эмиссии ПГ [18]. В первую очередь выделяется категория "drained inland organic soils", или осушенные органические почвы (не прибрежные). Далее выделяются такие подкатегории, как "Nutrient-poor" и "Nutrient-rich", что соответствует верховым и низинным торфяникам, затем следующие основные категории, по которым ведутся дальнейшие работы по определению выбросов/поглощений ПГ в российском Национальном кадастре ПГ: Forest Land, Cropland, Grassland, Peatland Managed for Extraction, что соответствует облесенным торфяникам, пахотным угодьям, сенокосам/пастищам, а также территориям добычи торфа / заброшенным территориям добычи торфа. Для каждой категории определены свои коэффициенты эмиссии ПГ, которые и используются в Национальном кадастре ПГ [17].

В Российской Федерации уже более 10 лет проводятся систематические измерения ПГ от торфоразработок [19, 20] с учетом их современного состояния, что также может способствовать уточнению коэффициентов эмиссии ПГ в целях корректировки итоговых выбросов ПГ, определяемых на национальном уровне.

Таким образом, основная цель работы – определить методологические основы проведения инвентаризации современного состояния торфяного фонда регионов Российской Федерации для актуализации качественного состояния и площадей торфяников.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

С целью использования результатов инвентаризации торфяного фонда регионов Российской Федерации в Национальном кадастре ПГ были определены основные виды современного состояния нарушенных торфяников, имеющие максимальное распространение в нашей стране и соответствующие категориям, используемым в работе [6], – это облесенные торфяники или леса на органических почвах (Forest Land); сельскохозяйственные угодья, включая сенокосы, луга и пастища (Grassland), а также добыча торфа (Peatland Managed for Extraction).

Весь спектр работ реализован в южной части Тюменской области, в частности, в двух муниципальных образованиях – Нижнетавдинском и Тюменском муниципальных районах.

Общая методика работ по оценке современного состояния торфяников рассматриваемой территории состояла из трех этапов.

1. Камеральный этап:

анализ данных по балансовым запасам торфа, включая контуры торфяников, числящихся на государственном балансе общераспространенных полезных ископаемых (ОПИ);

анализ всех доступных картографических материалов (геологических, почвенных, топографических и других карт и карт-схем) с целью выявления всех заболоченных территорий;

анализ данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) и выделение эталонных участков, однозначно характеризующих тип современного состояния и использования, таких как луга и пастбища, выработанные торфяники, облесенные территории, обводненные территории и т.д.;

определение торфяников или их отдельных частей для проведения полевых работ с целью подтверждения вида современного состояния и использования, а также сбора полевых данных.

2. Полевой этап:

верификация данных камерального этапа с целью подтверждения или опровержения предварительных результатов;

сбор фактических данных о состоянии торфяников, в частности, определение фактического вида землепользования, описание доминантных видов растений, измерение остаточной мощности торфа, уровня болотных вод (УБВ) и оценка общей степени обводненности.

3. Корректировка первичной информации на основе совмещения камеральных и полевых данных.

На этапе камеральных работ было проанализировано 14 карт и карт-схем, включая общие сведения о территории района работ, состояние изученности торфяного фонда района работ, геологическое строение, гидрологические и гидрогеологические условия района.

Для анализа архивных материалов были собраны данные из 98 источников по маршрутным, рекогносцировочным и детальным разведкам торфяников, а также 25 паспортов торфяных месторождений, а также рассмотрено 6 источников фондовой информации о состоянии нераспределенного фонда недр (месторождений торфяного сырья).

Обобщены и проанализированы ретроспективные и современные данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) для подтверждения хозяйственного использования территории, определения современного состояния растительного покрова и характера застания поверхности месторождений. Такие работы проводились по всем 143 торфяникам. Анализ включал изучение 58 космических снимков за период с 1963 по 2024 гг.

Использовались следующие данные ДЗЗ:

1. Снимки Corona в период с 1963 по 1982 гг. (разрешение от 1,8 до 12 м/пикс);
2. Снимки Landsat 1–5 с 1973 по 1977 гг. (разрешение 60 м/пикс);
3. Снимки Landsat 4–5 TM с 1984 по 1999 гг. (разрешение 30 м/пикс);
4. Снимки Landsat 7 с 1999 по 2005 гг. (разрешение 30 м/пикс);
5. Высокодетальные снимки WorldView-2 за 2018, 2021, 2022 и 2023 гг. (разрешение 0,5 м/пикс).

В рамках полевых работ было обследовано 57 контуров разных торфяных месторождений, равномерно распределенных по всей рассматриваемой территории (общее количество полевых точек обследования – 420). Все полевые работы были приурочены к однородным классам поверхности и характеризовали их типичное состояние. В каждой точке производились следующие работы:

зондирование торфяной залежи для определения остаточной мощности торфа;

отбор по две пробы верхнего слоя торфа на каждом однородном участке торфяной залежи для определения его основных характеристик (ботанического состава, степени разложения, плотности, пористости, влажности, зольности);

определение УБВ;

ботаническое описание всех однородных участков поверхности торфяного месторождения с выделением основных видов растительности;

обследование осушительной сети и сети противопожарных водоемов и каналов на предмет их застарания, оплывания, заиливания, разрушения, перекрытия бобровыми плотинами и др.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

По итогам сбора и обобщения фондовой информации о торфяниках на территории рассматриваемых муниципальных районов выявлено 143 торфяных месторождения. Их общая площадь составляет 416 328 га, две трети из которых занимают два торфяных месторождения – Тарманское и Лайминское (соответственно 30 и 33 % от общей площади всех торфяных месторождений рассматриваемых районов). В табл. 1 представлено распределение торфяников по площади и типу залежи.

Таблица 1. Анализ распределения торфяников Нижнетавдинского и Тюменского районов Тюменской области

Площади торфяных месторождений	Количество торфяных месторождений		
	Нижнетавдинский район	Тюменский район	Всего
Менее 100 га	8	65	73
100...500 га	16	16	32
500...1 000 га	11	3	14
Более 1 000 га	15 (включая Мирское и Лайминское)	8 (включая Тарманское)	24
ИТОГО			143
Распределение торфяников по типу залежи	Количество торфяников		
Верховых	4	11	15
Низинных	33	71	104
Переходных	4	4	8
Комплексных	10	6	16
ИТОГО			143

Анализ данных ДЗЗ охватывал весь период использования торфяников. В частности, был определен вид первоначального использования и соответствующий период, последующий вид хозяйственного использования торфяников, а также вид современного состояния или хозяйственного использования. Типы землепользования, такие как добыча торфа, лесная мелиорация и сельское хозяйство, определялись по прямым и косвенным дешифровочным признакам. Если для добычи торфа характерна частая сеть карточных и магистральных осушительных каналов, участки открытого торфа, то для сельского хозяйства – более широкая сеть каналов, присутствие луговой растительности и следов распашки, а для лесной мелиорации – сеть, состоящая из прямых и косых линий каналов, и лесная растительность. В результате были определены соответствующие эталонные участки космических снимков для дешифрирования по ним всей рассматриваемой территории.

На основе данного этапа были выявлены основные виды современного использования нарушенных торфяников и их площади, выделены однородные и типичные участки торфяников, определены объекты для полевых работ.

В первую очередь следует отметить, что единственным способом добычи торфяного сырья на территории рассматриваемого района был фрезерный способ. На рис. 1 представлены периоды и длительность добычи торфа в Нижнетавдинском и Тюменском районах Тюменской области.

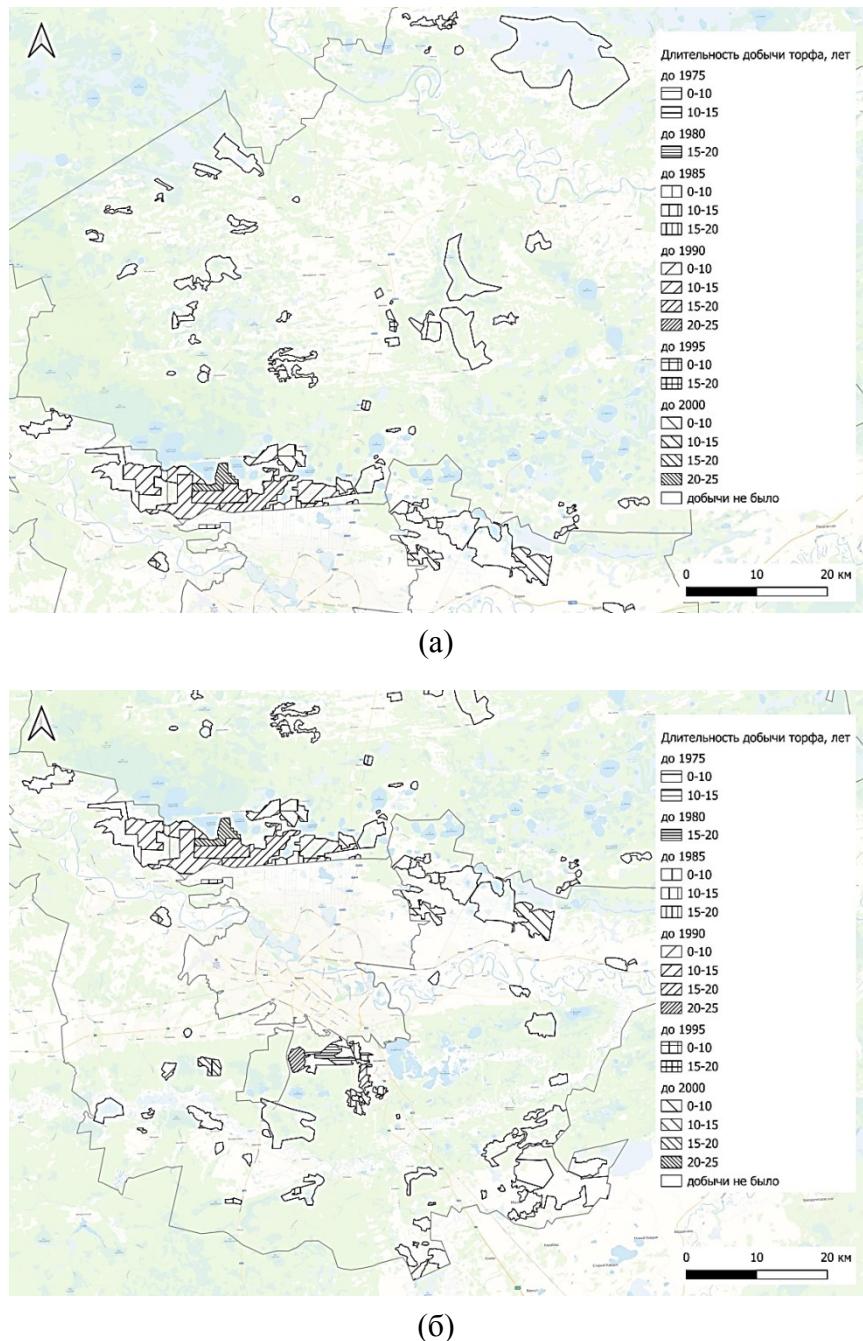


Рис. 1. Периоды и длительность добычи торфа в Нижнетавдинском (а) и Тюменском (б) районах Тюменской области

Всего было выделено 29 торфяников, на которых велась добыча торфа (в Нижнетавдинском районе – на 13 объектах, в Тюменском – на 16). Большинство торфяников разрабатывалось до 1990–2000 гг. В последующие годы добыча торфа осуществлялась только на отдельных частях двух торфяных месторождений – Тарманского и Борового. Таким образом, торфодобыча велась на площади 21 762 га.

На втором этапе анализировалась история последующего использования данных торфяников и определялось их современное состояние. На рис. 2 представлена карта истории землепользования рассматриваемых районов.

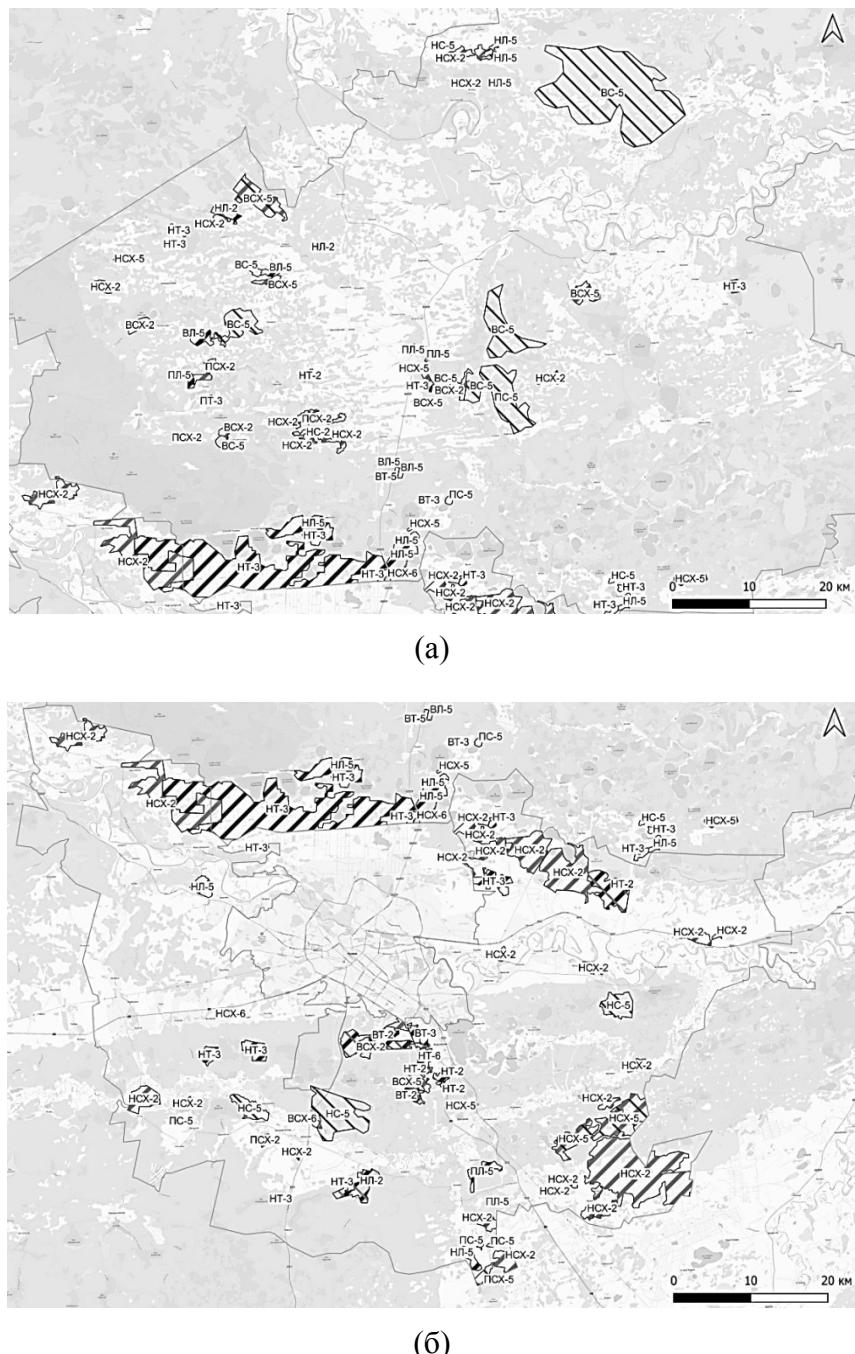


Рис. 2. Карта истории землепользования Нижнетавдинского (а) и Тюменского (б) районов Тюменской области. Легенда к карте (в)

- Верховой тип**
- ВЛ-5 лесная мелиорация - влажные, заболоченные леса и залесенные болота
 ВС-5 слабонарушенное - влажные, заболоченные леса и залесенные болота
 ВСХ-2 сельское хозяйство - луга и пастбища, частично закустаренные
 ВСХ-5 сельское хозяйство - влажные, заболоченные леса и залесенные болота
 ВСХ-6 сельское хозяйство - обводненные торфяники
 ВТ-2 добыча торфа - луга и пастбища, частично закустаренные
 ВТ-3 добыча торфа - выработанные и заброшенные торфяники
 ВТ-5 добыча торфа - влажные, заболоченные леса и залесенные болота
- Низинный тип**
- НЛ-2 лесная мелиорация - луга и пастбища, частично закустаренные
 НЛ-5 лесная мелиорация - влажные заболоченные леса и залесенные болота
 НС-2 слабонарушенное - луга и пастбища, частично закустаренные
 НС-5 слабонарушенное - влажные, заболоченные леса и залесенные болота
 НСХ-2 сельское хозяйство - луга и пастбища, частично закустаренные
 НСХ-5 сельское хозяйство - влажные, заболоченные леса и залесенные болота
 НСХ-6 сельское хозяйство - обводненные торфяники
 НТ-2 добыча торфа - луга и пастбища, частично закустаренные
 НТ-3 добыча торфа - выработанные и заброшенные торфяники
 НТ-5 добыча торфа - обводненные торфяники
- Переходный тип**
- ПЛ-5 лесная мелиорация - влажные, заболоченные леса и залесенные болота
 ПС-5 слабонарушенное - влажные, заболоченные леса и залесенные болота
 ПСХ-2 сельское хозяйство - луга и пастбища, частично закустаренные
 ПСХ-5 сельское хозяйство - влажные, заболоченные леса и залесенные болота
 ПСХ-3 добыча торфа - выработанные и заброшенные торфяники

(в)

Рис. 2. Продолжение

Анализ истории использования торфяников показал, что наиболее распространенным изменением типов землепользования являются низинные болота, которые ранее осушались для сельскохозяйственных целей и в настоящее время представляют собой луга и пастбища, частично закустаренные. Распространены также типы перехода низинных болот, осущенных с целью добычи торфа и на сегодняшний день представляющих собой заброшенные торфяники.

Низинные болота, осущенные для сельского хозяйства и на текущий момент представляющие собой луга и пастбища, имеют наибольшую площадь. Широко распространены слабонарушенные верховые болота, которые остались влажными заболоченными лесами и залесенными болотами.

На следующем этапе были определены объекты для полевых работ с целью сбора фактических данных о состоянии торфяников, в частности, установлен фактический вид землепользования, описаны доминантные виды растений, измерена остаточная мощность торфа, УБВ и дана оценка общей степени обводненности.

В результате полевых работ было выявлено, что на территориях, использованных для сельского хозяйства, остаточная мощность торфа практически отсутствовала. На отдельных участках глубина торфа не превышала 30 см. Таким образом, эти территории не могут считаться торфяниками. Вероятнее всего, их следует отнести к землям сельскохозяйственного назначения.

На облесенных участках остаточная мощность торфа была также невелика. В среднем по исследованным участкам глубина торфа колебалась в диапазоне 50 ± 40 см.

Результаты инвентаризации нарушенных торфяников рассматриваемых муниципальных районов Тюменской области представлены в табл. 2.

Таблица 2. Виды современного состояния нарушенных торфяников
Нижнетавдинского и Тюменского районов Тюменской области

Вид хозяйственного использования	Вид первичного хозяйственного использования	Тип торфяной залежи	Площадь, га	Доля, %	
Влажные, заболоченные леса и залесенные болота (Forest Land)	Добыча торфа	Верховое	64,3	43,7	
		Переходное	113,9		
	Лесная мелиорация	Верховое	573,1		
		Низинное	2 516,80		
		Переходное	778,5		
		Верховое	2 678,60		
		Низинное	3 890,10		
	Сельское хозяйство	Переходное	272,9		
		Верховое	19 574,70		
		Низинное	5 036,50		
	Слабонарушенное	Переходное	3 000,10		
		ВСЕГО		38 499,5	
Выработанные и заброшенные торфяники (Peatland Managed for Extraction)	Добыча торфа	Низинное	16 507,50	18,8	
		ВСЕГО			
			16 507,50		
Луга и пастбища, частично закустаренные (Grassland)	Добыча торфа	Верховое	2 117,00	36,9	
		Низинное	2 476,40		
	Лесная мелиорация	Низинное	1 368,00		
		Верховое	1 386,60		
	Сельское хозяйство	Низинное	24 012,60		
		Переходное	1 010,90		
	Слабонарушенное	Низинное	79,2		
		ВСЕГО			
		32 450,70			
Обводненные торфяники (Rewetted peatlands)	Добыча торфа	Низинное	20,9	0,3	
	Сельское хозяйство	Верховое	93,1		
	Сельское хозяйство	Низинное	142,1		
	ВСЕГО		256,1		
Частичная застройка (Settlements)	Добыча торфа	Верховое	319,7	0,4	
	ВСЕГО		319,7		
ИТОГО			88 033,50	100,0	

По итогам полевого этапа были существенно скорректированы предварительные данные. В первую очередь, все территории, используемые последние 20 лет под сенокосы и пастбища, не содержат торфа. Получается, что из 88 033,5 га нарушенных торфяников 32 450,7 га (36,9 %) в настоящее время не являются торфяными месторождениями.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработаны методологические основы проведения инвентаризации торфяного фонда для последующего использования полученных данных при оценке выбросов парниковых газов на национальном уровне. Обязательными этапами работ являются:

- 1) сбор фондовых данных о контурах торфяников, числящихся на государственном балансе ОПИ, поскольку только такие торфяники могли быть использованы для добычи торфа;
- 2) анализ данных ДЗЗ для определения периодов разработки торфяников и видов последующего использования этих территорий.

Используя данные полевого этапа, можно исключить из дальнейшей работы участки, используемые для сенокосов и пастбищ, и уже на основе этих данных получить информацию о площадях ранее осущенных торфяников регионов РФ.

Дальнейшие работы, в частности полевые исследования, значительно повышают точность инвентаризации.

Результаты работ, проведенных в указанных выше районах Тюменской области, показали, что из 416 328 га торфяных болот, числящихся на государственном балансе полезных ископаемых, в период активного освоения торфяников было нарушено 88 033 га, что составляет 21 % от общей площади торфяных болот. При этом наиболее распространенным типом современного состояния торфяников являются залесенные территории (43,7 %). На втором месте находятся сельскохозяйственные угодья в виде лугов, пастбищ и сенокосов (36,9 %). Поскольку эти территории не содержат остаточного слоя торфа, они могут быть исключены из площадей торфяников, используемых в Национальном кадастре ПГ. На третьем месте – заброшенные торфяники без следов рекультивации, т.е. брошенные поля фрезерной добычи торфа (18,8 %). Обводненные и застроенные территории занимают не более половины процента от общей площади использованных торфяников. Этот факт подтверждается полевыми исследованиями. Еще одним результатом работ стали эталонные изображения современного состояния торфяников, полученные со спутниковых снимков, использование которых существенно повышает качество и достоверность результатов работ по ДЗЗ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Яблонев А.Л., Пухова О.В. Современные направления использования торфа // *Вестник Тверского государственного технического университета*. 2010. № 17. С. 104–107.
2. Мисников О.С., Тимофеев А.Е. О рациональном использовании энергетических и минеральных ресурсов торфяных месторождений // *Горный журнал*. 2008. № 11. С. 59–63.
3. Мисников О.С., Копенкина Л.В. Возникновение торфяного дела в России // *Горный журнал*. 2020. № 2. С. 95–99.
4. Мисников О.С., Тимофеев А.Е., Михайлов А.А. Анализ технологий разработки торфяных месторождений в странах дальнего и ближнего зарубежья // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2011. № 9. С. 84–92.

5. Алпеева Е.А., Гончаров М.С. Торфяная промышленность Российской Федерации. Проблемы и перспективы // *Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии*. 2021. № 3. С. 121–130.
6. Воскобойник М.П. Прогноз добычи торфа в условиях инновационного развития экономики России // *Горная промышленность*. 2015. № 4 (122). С. 22.
7. Синюткина А.А., Малолетко А.А., Беленко А.А., Гашкова Л.П., Харанжевская Ю.А. Оценка современного состояния перспективных для освоения участков торфяных месторождений Томской области // *Достижения науки и техники АПК*. 2014. № 12. С. 72–75.
8. Нагорнов Д.О. Технология добычи торфяного сырья в СЗФО // *Высшая школа*. 2015. № 9. С. 63–66.
9. Заровняев Б.Н., Попов В.Ф., Шубин Г.В., Будкина М.Е., Соколова М.Д. Перспективы освоения месторождений торфа арктических и субарктических районов России // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2020. № 6. С. 168–177.
10. Панов В.В., Мисников О.С. Современные тенденции развития торфяной отрасли России // *Труды Инсторфа*. 2015. № 11 (64). С. 3–12.
11. Плакиткина Л.С., Апухтин П.А. Анализ развития торфяной промышленности в России и мире в период с 2000 по 2009 годы // *Горная промышленность*. 2011. № 1 (95). С. 4–12.
12. Панов В.В., Мисников О.С., Купорова А.В. Проблемы и перспективы развития торфяного производства в Российской Федерации // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2017. № 5. С. 105–117.
13. Singh K. Allocation and Sustainable Management of Peat Resources on Public Land // *AEP Public Land Management*. 2016. № 9. Р. 1–14.
14. А.А. Романовская [и др.]. Национальный доклад о кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов, не регулируемых Монреальским протоколом за 1990–2020 гг. Москва, 2022. 468 с. URL: http://downloads.igce.ru/kadastr/RUS_NIR-2022_v1_rev.pdf (дата обращения: 17.04.2025).
15. Торфяные болота России: к анализу отраслевой информации / под ред. А.А. Сирина и Т.Ю. Минаевой. М.: Геос, 2001. 190 с.
16. Глобальный климат и почвенный покров России: опустынивание и деградация земель, институциональные, инфраструктурные, технологические меры адаптации (сельское и лесное хозяйство): Национальный доклад / под ред. Р.С.-Х. Эдельгериева. М.: ООО «Издательство МБА», 2019. Т. 2. 476 с.
17. Коротков В.Н., Трунов А.А., Исаева А.В., Медведева М.А. Торфяники в национальном кадастре парниковых газов // *Западно-Сибирские торфяники и цикл углерода: прошлое и настоящее: Материалы Седьмого Международного полевого симпозиума*. Томск: ТГУ, 2024. С. 11–12.
18. IPCC 2014, 2013 Supplement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Wetlands / Eds. Hiraishi T., Krug T., Tanabe K., Srivastava N., Baasansuren J., Fukuda M., Troxler T.G. Switzerland: IPCC, 2014.
19. Кривенок Л.А., Суворов Г.Г., Авилов В.К., Сирин А.А. Измерение потоков CO₂, CH₄ и H₂O методом турбулентных пульсаций: использование мобильной установки и учет изменяющейся зоны охвата // *Оптика атмосферы и океана*. 2019. № 11. С. 942–950.
20. Суворов Г.Г., Чистотин М.В., Сирин А.А. Потери углерода при добыче торфа и сельскохозяйственном использовании осущенного торфяника в Московской области // *Агрохимия*. 2015. № 11. С. 51–62.

Для цитирования: Шахматов К.Л., Орлов Т.В., Пухова О.В., Архипова М.В., Бондарь В.В. Методология инвентаризации торфяного фонда Российской Федерации для реализации геотехнологий и целей национального кадастра парниковых газов // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2025. № 3 (27). С. 59–70.

**METHODOLOGY OF INVENTORY OF THE PEATLANDS
OF THE RUSSIAN FEDERATION FOR THE IMPLEMENTATION
OF GEOTECHNOLOGIES AND OBJECTIVES
OF THE NATIONAL GREENHOUSE GAS CADASTRE**

K.L. SHAKHMATOV¹, Cand. Sc., T.V. ORLOV², Cand. Sc., O.V. PUKHOVA¹, Cand. Sc.,
M.V. ARKHIPOVA², Cand. Sc., V.V. BONDAR², Postgraduate

¹Tver State Technical University,

22, Af. Nikitin emb., Tver, 170026, e-mail: krl81@list.ru

²Sergeev Institute of Environmental Geoscience RAS,

13, bldg 2, Ulanskiy lane, Moscow, 101000, e-mail: tim.orlov@gmail.com

The article discusses methodological approaches to inventorying the current state of peat birthplaces for the purposes of selecting a site for climate projects, as well as to clarify the areas and state of peatlands for conducting an inventory of anthropogenic young greenhouse gases. A sequence of actions, as well as materials and methods for achieving the stated goals are proposed. The results of practical implementation of the developed algorithm of actions are also presented using the example of two municipalities of the Tyumen region.

Keywords: peatlands, peatland inventory, drained peatlands, greenhouse gas inventory, climate project.

Поступила в редакцию/received: 17.04.2025; после рецензирования/revised: 27.04.2025;
принята/accepted: 30.04.2025

УДК 622.232.8

**СОЗДАНИЕ И ОЦЕНКА 3D-МОДЕЛИ СПИРАЛЬНО-КОНИЧЕСКОЙ
ЗУБЧАТОЙ ПЕРЕДАЧИ ТРАНСМИССИИ ГОРНОЙ ТЕХНИКИ**

К.Х. ФАМ¹, канд. техн. наук, Х.Т. ДИНЬ¹, асп.,
В.Т. ФАМ¹, магистр, М.Ю. КУХАРЬ², асп.

¹Технический университет им. Ле Куи Дона,

Вьетнам, Ханой, ул. Хоанг Куок Вьет, 100, e-mail: phqhoang@gmail.ru

²Национальный исследовательский технологический университет МИСИС,
119049, Москва, Ленинский пр., 4, стр. 1, e-mail: artvik@bk.ru

© Фам К.Х., Динь Х.Т., Фам В.Т., Кухарь М.Ю., 2025

В статье представлены основные этапы создания 3D-модели спирально-конической зубчатой передачи с помощью пакета программ Autodesk Inventor. Построение модели выполнено с помощью расчета координат сетки точек на поверхности зуба в программном модуле MITCalc. Результаты проверки геометрии

*Вестник Тверского государственного технического университета.
Серия «Технические науки». № 3 (27), 2025*

ческих параметров и оценки зацепляемости компьютерной модели подтверждают ее высокую точность и хорошую сходимость с проектными расчетами. Полученная виртуальная копия может использоваться для моделирования работы спирально-конической зубчатой передачи, а также при изготовлении и ремонтном восстановлении ее элементов.

Ключевые слова: спирально-коническая зубчатая передача, горные машины, проектирование, 3D-модель, Autodesk Inventor, MITCalc, геометрические параметры, точность, работоспособность.

DOI: 10.46573/2658-5030-2025-3-70-80

ВВЕДЕНИЕ

Спирально-коническая зубчатая передача широко используется в передаточных механизмах и трансмиссиях промышленного оборудования и транспорта благодаря таким преимуществам, как большая передаваемая мощность, стабильное передаточное отношение, высокая эффективность и низкий уровень шума [1–3]. В частности, эти передачи часто применяют в трансмиссиях автомобилей, строительной техники, воздушного и морского транспорта, коробках скоростей и подач металлорежущих станков, робототехнике. Горные машины и оборудование, работающие в тяжелых условиях и под воздействием больших нагрузок, также часто используют в своих трансмиссиях спирально-конические зубчатые передачи. На рис. 1 показана главная передача заднего моста самосвала БелАЗ, которая представляет собой спирально-коническую зубчатую передачу. Данный механизм отвечает за передачу мощности и момента от выхода редуктора (через карданный вал) к ведущим колесам. В связи с работой в тяжелых условиях больших, меняющихся и ударных нагрузок к проектированию и обработке спирально-конических зубчатых передач предъявляются строгие технические требования.



Рис. 1. Главная передача заднего моста самосвала БелАЗ

Построение модели спирально-конической зубчатой передачи имеет большое значение на этапе проектирования изделия, поскольку созданную цифровую модель можно использовать для выполнения прочностного анализа конструкции методом конечных элементов (FEA) [4–7], анализа контакта зубьев без нагрузок (TCA) и с нагрузками (LTCA) [8–12], для моделирования и оптимизации процесса механической обработки и сборки изделия [13–15], а также для параметрической оптимизации поверхности зуба с целью повышения качества зацепления спирально-конической зубчатой передачи [16–18]. Поэтому исследование этапов построения модели спирально-конической зубчатой передачи представляет интерес для исследователей, инженеров-конструкторов проектных организаций и инженеров-технологов предприятий горного машиностроения.

В технической литературе опубликовано множество работ по построению 3D-модели спирально-конической зубчатой передачи. В частности, в работах Литвина (Litvin) и др. [19, 20] накоплены достаточно обширные данные по этой передаче, представлены важные сведения. Авторы смоделировали процесс обработки спирально-конических колес с круговыми зубьями математическим способом и рассчитали поверхность зуба, решив уравнение зацепления, которое является сложным нелинейным уравнением, связанным с производственным процессом. Уравнение зацепления применялось многими другими исследователями для моделирования поверхности зуба. Ши (Shih) и др. [21] изучили математическую модель поверхности зуба спирально-конических колес с удлиненными эпициклоидными зубьями. Чжоу (Zhou) и Чэн (Chen) [22] предложили новую геометрическую теорию зацепления для получения замкнутого представления поверхности зубьев спирально-конических колес с круговым зубом. Дин (Ding) и др. [23] предложили подход к моделированию для построения CAD-модели спирально-конических зубчатых передач.

Точность модели повышается с помощью различных методов оптимизации [24]. Чжоу (Zhou) и коллеги [25] представили новый метод пересчета точек поверхности зуба для генерации новых приблизительно равноудаленных точек и кривых. Для пересчета точек поверхности зуба используется отображение между изопараметрической кривой и новой приблизительно равноудаленной кривой. Для решения нелинейного уравнения, установленного из отображения, предложен новый глобальный алгоритм оптимизации – генетический алгоритм релаксации с реальным кодированием (RRGA) для стабильного получения решений.

Авторами указанных выше исследований на основе принципа обработки спирально-конической зубчатой передачи рассчитаны и построены параметрические кривые на поверхности зуба. Однако в связи с тем, что профиль зуба включает множество сложных кривых, этот расчет требует больших усилий и построение 3D-модели спирально-конической зубчатой передачи в целом остается сложной задачей.

В настоящее время, благодаря развитию программного обеспечения, построение 3D CAD-модели спирально-конической зубчатой передачи стало более удобным. В частности, программное обеспечение MITCalc (Mechanical, Industrial and Technical Calculations) позволяет рассчитывать и проектировать многие детали распространенных типов механических передач, таких как цилиндрические шестерни, конические шестерни, цепные передачи, подшипники, пружины, валы, защелки и т.д. Программное обеспечение написано в Microsoft Excel и имеет дружественный интерфейс, поэтому его достаточно легко использовать. MITCalc особенно подходит для многих 2D и 3D CAD-систем (AutoCAD, AutoCAD LT, IntelliCAD, TurboCAD, BricsCAD, ZWCAD, ProgeCAD, Autodesk Inventor, SolidWorks, SolidEdge, Creo и пр.). Результаты большинства расчетов можно легко преобразовать в 2D-чертежи или 3D-модели, поэтому создание CAD-моделей для деталей со сложными профилями, таких как спирально-коническая зубчатая передача, требует гораздо меньших усилий.

В данной статье предлагается метод создания 3D-модели спирально-конической зубчатой передачи с использованием CAD-системы и программного обеспечения MITCalc для расчета координат точек на поверхности зуба и импорта их в Autodesk Inventor для построения поверхности. Для оценки точности и надежности модели измерены геометрические параметры зубчатой модели и проверена способность зацепления.

ПОСТРОЕНИЕ 3D-МОДЕЛИ СПИРАЛЬНО-КОНИЧЕСКОЙ ЗУБЧАТОЙ ПЕРЕДАЧИ

Спирально-коническая зубчатая передача, выбранная для построения модели, рассчитана по стандарту ISO 23509:2006 с исходными данными, указанными в табл. 1.

Таблица 1. Таблица исходных данных спирально-конической зубчатой передачи

Параметр	Символ	Единица	Шестерня	Колесо
Количество зубьев	Z	—	14	39
Гипоидное смещение	a	мм	0	
Межосевой угол	Σ	град	90	
Средний нормальный модуль	m_n	мм	3,213	
Внешний делительный диаметр	d_e	мм	—	176,893
Ширина зубчатого венца	b	мм	25,4	
Средний угол наклона зуба	β_n	град	—	35
Угол профиля	α_n	град	20	20
Направление линии зуба	—	—	Левое	Правое

Вышеуказанные параметры вводятся в программу MITCalc для расчета остальных параметров зубчатой передачи. Результаты расчета (рис. 2) полностью совпадают с расчетами по стандартам ISO 23509:2006.

<u>Определение параметров делительного конуса</u>		
4.9. Угол делительного конуса	delta1,2	19,7468 [°]
4.10. Внешнее конусное расстояние	Re1,2	93,9726 [мм]
4.11. Среднее конусное расстояние	Rm1,2	81,2726 [мм]
4.12. Внутреннее делительное конусное расстояние	Ri1,2	68,5726 [мм]
4.13. Средний угол наклона зуба	betam1,2	35,0000 [°]
4.14. Ширина зубчатого венца	b1,2	25,4000 [мм]
4.15. Фактор ширины зубчатого венца	cbe2	0,5000 [~]
<u>Определение исходных данных</u>		
4.16. Внешний делительный диаметр	de1,2	63,5001 [мм]
4.17. Средний делительный диаметр	dm1,2	54,9183 [мм]
4.18. Внутренний делительный диаметр	di1,2	46,3365 [мм]
4.19. Угол отклонения вала от 90 градусов	DeltaSigma	0,0000 [°]
4.20. Угол смещения в осевой плоскости шестерни	zetam	0,0000 [°]
4.21. Угол смещения в делительной плоскости	zetamp	0,0000 [°]
4.22. Смещение в делительной плоскости	ap	0,0000 [мм]
4.23. Средний нормальный модуль	mmn	3,2133 1,6300 < [мм]
4.24. Внешний поперечный модуль	met2	4,5357 1,6300 < [мм]
4.25. Предельный угол давления	alfa_lim	0,0000 [°]
4.26. Сгенерированный нормальный угол давления	alfanD, alfanC	20,0000 [°]
4.27. Эффективный угол давления	alfaed, alfaec	20,0000 [°]
4.28. Внешняя ширина поверхности шестерни/колеса от расчетной точки	be1,2	12,7000 [мм]
4.29. Внутренняя ширина поверхности шестерни/колеса от расчетной точки	bi1,2	12,7000 [мм]
4.30. Точка пересечения до точки расчета вдоль оси шестерни/колеса	tzm1,2	76,4933 27,4591 [мм]
4.31. Вершина тангажа за точкой пересечения вдоль оси	tz1,2	0,0000 0,0000 [мм]
4.32. Средняя рабочая глубина	hmv	6,4266 [мм]
4.33. Средняя дополнительная глубина шестерни/колеса	ham1,2	4,8369 1,5897 [мм]
4.34. Средняя выступающая глубина шестерни/колеса	hfm1,2	2,3931 5,6402 [мм]
4.35. Средняя общая глубина	hm	7,2299 [мм]
4.36. Угол конуса вершин шестерни/колеса	deltaa1,2	26,2402 72,3874 [°]
4.37. Угол конуса впадин шестерни/колеса	deltaf1,2	17,6126 63,7598 [°]

Рис. 2. Результаты расчета параметров спирально-конической зубчатой передачи в программе MITCalc

Программное обеспечение MITCalc вычисляет координаты сетки точек на поверхности зуба и экспортирует их в файлы Excel для создания набора данных и построения 3D-модели в программном обеспечении CAD. Процесс построения

3D-модели спирально-конической шестерни Z14 в Autodesk Inventor включает следующие этапы:

- 1) построение заготовки путем поворота сечения на 360° вокруг оси;
- 2) построение 3D-эскиза и разрез заготовки для создания канавки зуба;
- 3) выполняемое 13 раз копирование канавки зуба на 360° вокруг оси координат (рис. 3).

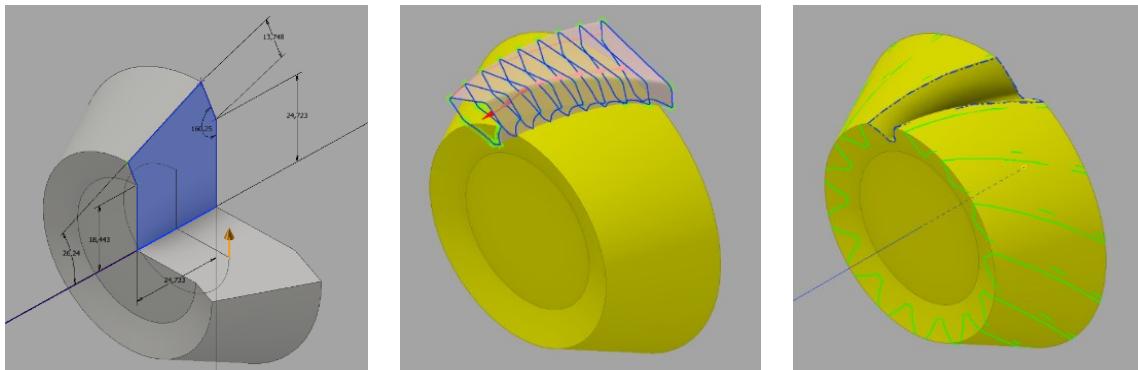


Рис. 3. Построение 3D-модели спирально-конической шестерни в Autodesk Inventor

Аналогично для колеса Z39, прорисовав вал шестерни Z14 и отверстие колеса Z39, получим 3D-модель спирально-конической зубчатой передачи, показанную на рис. 4.

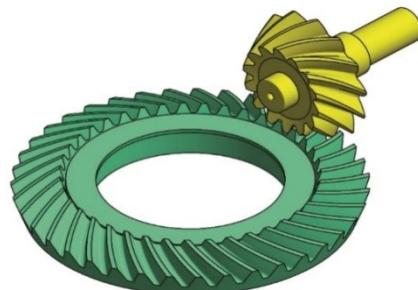


Рис. 4. 3D-модель спирально-конической зубчатой передачи

ПРОВЕРКА ТОЧНОСТИ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

Для того чтобы проверить точность полученной 3D-модели спирально-конической зубчатой передачи, сначала измеряем геометрические параметры модели и сравниваем с результатами расчета по стандарту ISO 23509:2006. Результаты измерения и сравнения показаны на рис. 5 и обобщены в табл. 2. Измеряют 20 параметров, включая те, которые связаны: 1) с точностью заготовки, в том числе внешнее конусное расстояние, среднее конусное расстояние, ширина зубчатого венца, угол делительного конуса, угол конуса вершин, средний делительный диаметр, внешний делительный диаметр, внешний диаметр вершин зубьев; 2) с точностью профиля зуба, в том числе средний угол наклона зуба, внешний угол наклона средней линии зуба, внутренний угол наклона средней линии зуба, угол конуса впадин, средняя делительная толщина зуба.

Результат проверки показывает, что 19 из 20 измеренных параметров полностью совпадают с расчетным значением по стандарту ISO 23509:2006. Имеется только один параметр, который не соответствует расчету, – это внешний угол наклона средней линии зуба. Однако погрешность его ничтожно мала и составляет $0,0005^\circ$. Тот факт,

что параметры, связанные с точностью профиля зуба, практически полностью совпадают с теоретическими расчетами, показывает, что полученная 3D-модель имеет высокую точность.

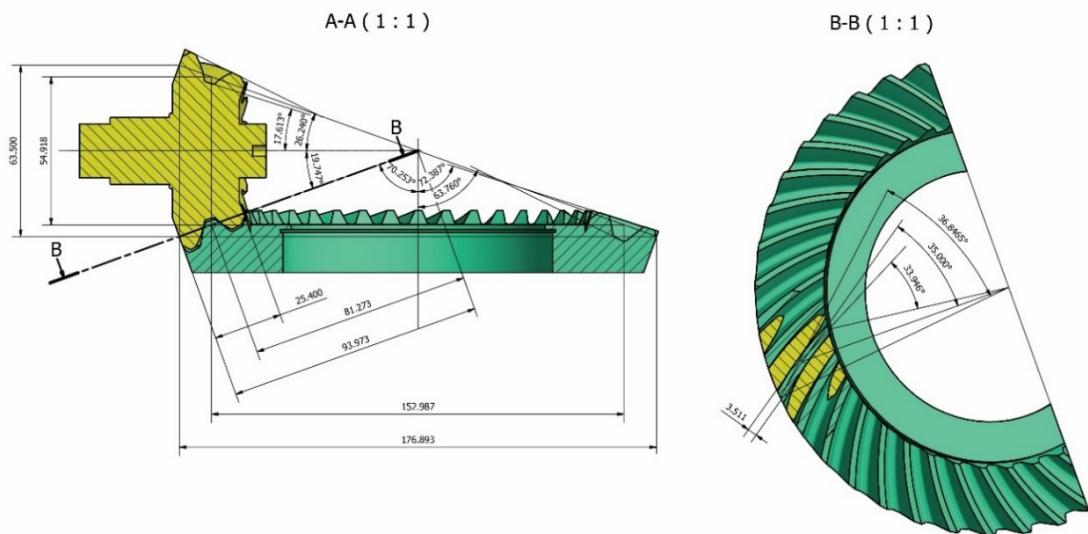


Рис. 5. Измерение геометрических параметров зубчатой передачи на модели

Таблица 2. Результат проверки параметров зубчатой передачи

№	Параметр	Символ	Единица измерения	Результат проверки		
				Расчетное значение	Измерительное значение	Погрешность
1	Внешнее конусное расстояние	R_e	мм	93,973	93,973	0
2	Среднее конусное расстояние	R_m	мм	81,273	81,273	0
3	Ширина зубчатого венца	b	мм	25,4	25,4	0
4	Средний угол наклона зуба	β	град	35	35	0
5	Внешний угол наклона средней линии зуба	β_e	град	36,846	36,846 5	0,000 5
6	Внутренний угол наклона средней линии зуба	β_i	град	33,946	33,946	0

Окончание табл. 2

№	Параметр	Символ	Единица измерения	Результат проверки		
				Расчетное значение	Измерительное значение	Погрешность
12	Внешний диаметр вершин зубьев	d_{ae1}	мм	75,324	75,324	0
13	Средняя делительная толщина зуба	s_{mnc1}	мм	6,460	6,460	0
Колесо						
14	Угол делительного конуса	δ_2	град	70,253	70,253	0
15	Угол конуса вершин	δ_{a2}	град	72,387	72,387	0
16	Угол конуса впадин	δ_{f2}	град	63,760	63,760	0
17	Средний делительный диаметр	d_{m2}	мм	152,987	152,987	0
18	Внешний делительный диаметр	d_{e2}	мм	176,893	176,893	0
19	Внешний диаметр вершин зубьев	d_{ae2}	мм	178,288	178,288	0
20	Средняя делительная толщина зуба	s_{mnc2}	мм	3,511	3,511	0

ОЦЕНКА ЗАЦЕПЛЯЕМОСТИ

Для оценки зацепляемости полученной 3D-модели шестерню и колесо размещают в проектное положение сборки, чтобы проверить, пересекаются ли они друг с другом, с помощью функции «Анализ пересечений» в Autodesk Inventor (рис. 6). Было установлено, что между шестерней и колесом отсутствует область пересечения, т.е. в этом положении шестерня и колесо не соприкасаются друг с другом, между ними имеется зазор, что согласуется с расчетами. Затем, оставив колесо неподвижным, поворачивают шестерню на очень малый угол $0,075^\circ$, после чего проявляется область пересечения шестерни и колеса объемом $3,295 \cdot 10^{-5}$ мм³ (рис. 7). Это доказывает, что в данном положении шестерня и колесо начинают контактировать друг с другом.

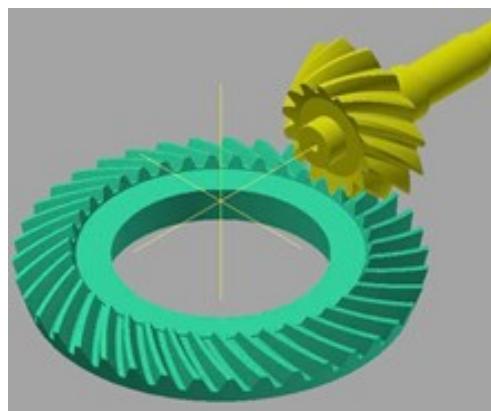


Рис. 6. Проектное положение сборки



Рис. 7. Начальное положение контакта

Если рассматривать шестерню и колесо как два абсолютно жестких объекта, то при вращении шестерни колесо будет вращаться в результате зацепления. Отношение угловых скоростей шестерни и колеса соответствует передаточному числу зубчатой передачи и составляет 39/14. Затем шестерня и колесо одновременно вращаются вокруг своей оси в данном соотношении. Наблюдаем и останавливаем в случайных положениях, чтобы оценить зацепляемость. Результаты испытаний показывают, что при остановке в любом положении появляется область пересечения шестерни и колеса с очень малым объемом ($2,191 \cdot 10^{-4}$; $8,743 \cdot 10^{-4}$; $5,974 \cdot 10^{-4}$; $4,632 \cdot 10^{-4}$ мм^3). Это доказывает, что шестерня и колесо контактируют друг с другом на протяжении всего процесса и хорошо зацепляются во время движения.

Таким образом, проверка геометрических параметров и оценки зацепляемости полученной модели показала, что она имеет более высокую точность по сравнению с проектными расчетами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленный метод построения 3D-модели спирально-конической зубчатой передачи в программе Autodesk Inventor с помощью расчета координат сетки точек на поверхности зуба в программе MITCalc обладает важным преимуществом: он обеспечивает требуемую точность изделия и при этом менее трудоемок по сравнению с выполнением проектных расчетов.

Результаты проверки геометрических параметров показывают, что значения 19 из 20 измеряемых параметров совпадают с расчетными по стандартам ISO 23509:2006. Не соответствует расчету только внешний угол наклона средней линии зуба. Однако его погрешность составляет всего 0,000 5°.

Результат оценки зацепляемости показывает, что в исходном положении сборки между шестерней и колесом имеется зазор. При повороте шестерни на очень малый угол 0,075° шестерня и колесо начинают контактировать друг с другом, и этот контакт сохраняется на протяжении всего процесса зацепляемого движения шестерни и колеса.

Приведенные результаты подтверждают, что полученную модель можно использовать для моделирования рабочего процесса функционирования спирально-конической зубчатой передачи (например, напряженно-деформированного состояния зубьев, износа, вибрации и т.д.), а также при разработке управляющих программ для

станков с ЧПУ по обработке зубчатых профилей на этапах изготовления и ремонтного восстановления зубчатой передачи [26].

ЛИТЕРАТУРА

1. Wang J., Kong L., Liu B., Hu X., Yu X., Kong W. The mathematical model of spiral bevel gears – A review // *Strojniški vestnik-Journal of Mechanical Engineering*. 2014. V. 60. № 2. P. 93–105.
2. Zheng F., Han X., Lin H., Zhao W. Research on the cutting dynamics for face-milling of spiral bevel gears // *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2021. V. 153. P. 107488.
3. Vivet M., Acinapura A., Dooner D.B., Mundo D. Loaded tooth contact analysis of spiral bevel gears with kinematically correct motion transmission // *Proceedings of the International Gear Conference*. Chartridge Books Oxford, 2018. P. 223–232.
4. Hotait M., Kahraman A., Nishino T. An investigation of root stresses of hypoid gears with misalignments // *Journal of Mechanical Design*. 2011. V. 133. № 7. P. 071006.
5. Ural A., Heber G., Wawrynek P.A., Ingraffea A.R., Lewicki D.G., Neto J.B. Three-dimensional, parallel, finite element simulation of fatigue crack growth in a spiral bevel pinion gear // *Engineering Fracture Mechanics*. 2005. V. 72. № 8. P. 1148–1170.
6. Hua X., Lim T., Peng T., Wali W. Dynamic analysis of spiral bevel geared rotor systems applying finite elements and enhanced lumped parameters // *International Journal of Automotive Technology*. 2012. V. 13. P. 97–107.
7. Hirmand M.R., Shojaei A., Riahi H.T. Finite element modeling of incremental bridge launching and study // *International Journal of Civil Engineering*. 2015. V. 13. № 1. P. 112–125.
8. Kawasaki K., Tsuji I. Analytical and experimental tooth contact pattern of large-sized spiral bevel gears in cyclo-palloid system // *Journal of Mechanical Design*. 2010. V. 132. № 4. P. 041004.
9. Astoul J., Geneix J., Mermoz E., Sartor M. A simple and robust method for spiral bevel gear generation and tooth contact analysis // *International Journal on Interactive Design and Manufacturing*. 2013. V. 7. P. 37–49.
10. Wang P.Y., Fan S.C., Huang Z.G. Spiral bevel gear dynamic contact and tooth impact analysis // *Journal of Mechanical Design*. 2011. V. 133. № 8. P. 084501.
11. Fu Y., Zhuo Y., Zhou X., Wan B., Lv H., Wang Z. Theoretical and Experimental Study on Contact Characteristics of Spiral Bevel Gears under Quasi-Static and Large Loading Conditions // *Applied sciences*. 2020. V. 10. № 15. P. 5109.
12. Simon V. Computer simulation of tooth contact analysis of mismatched spiral bevel gears // *Mechanism and Machine Theory*. 2007. V. 42. № 3. P. 365–381.
13. Brecher C., Klocke F., Brum M., Hardjosuwito A. Analysis and Optimization of Bevel Gear Cutting Processes by Means of Manufacturing Simulation // *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2013. V. 197. P. 271–284.
14. Mazak J., Klocke F., Bergs T., Brecher C. Simulation-based process analysis for discontinuous cutting of generated bevel gears // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part C Journal of Mechanical Engineering Science*. 2019. V. 233. № 21–22. P. 7378–7390.
15. Efstathiou C., Tapoglu N. A novel CAD-based simulation model for manufacturing of spiral bevel gears by face milling // *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. 2021. V. 33. P. 277–292.

16. Mermoz E., Astoul J., Sartor M., Linares J.M., Bernard A. A new methodology to optimize spiral bevel gear topography // *CIRP Annals – Manufacturing Technology*. 2013. V. 62. № 1. P. 119–122.
17. Artonia A., Gabiccini M., Kolivandb M. Ease-off based compensation of tooth surface deviations for spiral bevel and hypoid gears: Only the pinion needs corrections // *Mechanism and Machine Theory*. 2013. V. 61. P. 84–101.
18. Artoni A., Gabiccini M., Guiggiani M., Kahraman A. Multi-Objective Ease-Off Optimization of Hypoid Gears for Their Efficiency, Noise and Durability Performances // *Journal of Mechanical Design*. 2011. V. 133. № 12. P. 121007.
19. Litvin F.L., Fuentes A. Gear Geometry and Applied Theory. Cambridge: Cambridge University Press, 2004. 798 p.
20. Argyris J., Fuentes A., Litvin F.L. Computerized integrated approach for design and stress analysis of spiral bevel gears // *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2002; V. 191. № 11–12. P. 1057–1095.
21. Shih Y.P., Fong Z.H., Lin G.C.Y. Mathematical model for a universal face hobbing hypoid gear generator // *Journal of Mechanical Design*. 2007. V. 129. № 1. P. 38–47.
22. Zhou Y., Chen Z.C. A new geometric meshing theory for a closed-form vector representation of the face-milled generated gear tooth surface and its curvature analysis // *Mechanism and Machine Theory*. 2015. V. 83. P. 91–108.
23. Ding H., Tang J., Zhou Z., Cui W. Tooth flank reconstruction optimizations after simulation process modeling for the spiral bevel gear // *Proceedings of the institution of mechanical engineers, part C journal of mechanical engineering science*. 2015. V. 230. № 13. P. 2260–2272.
24. Ding H., Tang J., Zhong J., Wan G., Zhou Z. Simulation and optimization of computer numerical control-milling model for machining a spiral bevel gear with new tooth flank // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B Journal of Engineering Manufacture*. 2016. V. 230. № 10. P. 1897–1909.
25. Zhou Y., Peng S., Liu X., Liu S., Tang J. A novel method to generate the tooth surface model of face-milled generated spiral bevel gears // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2019. V. 102. P. 1205–1214.
26. Кухарь М.Ю. Повышение эффективности восстановления зубчатых колес трансмиссий горных машин на основе автоматизации технологической подготовки ремонтного производства // *Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство*. 2023. № 19. С. 172–179.

Для цитирования: Фам К.Х., Динь Х.Т., Фам В.Т., Кухарь М.Ю. Создание и оценка 3D-модели спирально-конической зубчатой передачи трансмиссии горной техники // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2025. № 3 (27). С. 70–80.

CREATING AND EVALUATING OF HELICAL-BEVEL GEAR 3D MODEL OF MINING MACHINERY TRANSMISSION

Q.H. PHAM¹, Cand. Sc., H.T. DINH¹, Postgraduate,
V.T. PHAM¹, Postgraduate, M.Yu. KUKHAR², Postgraduate

¹Le Qui Don Technical University,
100, Hoang Quoc Viet st., Hanoi, Vietnam, e-mail: phqhoang@gmail.ru
²National Research Technological University "MISIS",
Building 1, 4, Leninsky pr., Moscow, 119049, e-mail: artvik@bk.ru

The article presents the main stages of creating a 3D model of a helical-bevel gear train using the Autodesk Inventor software package. The 3D model of the gears transmissions was constructed by calculating the coordinates of a grid of points on the tooth surface in the MITCalc software module. The results of checking the geometric parameters and evaluating the engagement of the computer model confirm its high accuracy and good convergence with the design calculations. The resulting virtual copy can be used to simulate the operation of a helical-bevel gear transmission, as well as in the manufacture and repair of its elements.

Keywords: Helical-bevel gear, mining machines, design, 3D model, Autodesk Inventor, MITCalc, geometric parameters, accuracy, operability.

Поступила в редакцию/received: 21.04.2025; после рецензирования/revised: 27.04.2025;
принята/accepted: 30.04.2025

УДК 504.062

ТЕХНОГЕННОЕ ЗАСОЛЕНИЕ ПОЧВ НА КРАЙНЕМ СЕВЕРЕ: ОБЗОР ПРОБЛЕМ И ПОТЕНЦИАЛЬНЫХ РЕШЕНИЙ

А.С. ДАНИЛОВ¹, канд. техн. наук, Э.А. КРЕМЧЕЕВ², д-р техн. наук

¹Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II,
199106, Санкт-Петербург, линия 21-я В.О., д. 2, e-mail: Danilov_AS@pers.spmi.ru

²Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»,
190121, Санкт-Петербург, ул. Союза Печатников, д. 16, e-mail: kremcheev@mail.ru

© Данилов А.С., Кремчев Э.А., 2025

Засоление считается основным фактором, который негативно воздействует более чем на 1 млрд га почв в мире и продолжает увеличиваться на 1,5 млн га/год. Проблема засоления в первую очередь связана с сельскохозяйственными землями аридных зон, однако горнодобывающие предприятия также способствуют росту площадей засоленных почв, извлекая рассолы и вскрышные породы на поверхность. Процессы засоления в арктических регионах России протекают более остро, поскольку соли способствуют развитию термокарста, термоэрозии и солифлюкции, вследствие

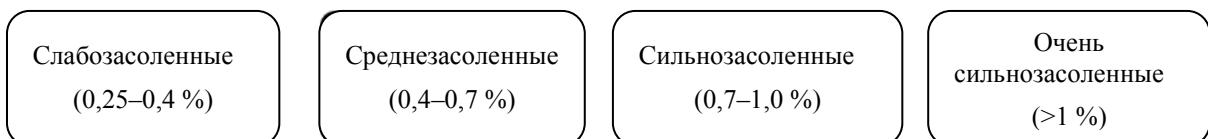
чего углубляется уровень вечной мерзлоты и образуются хемоземы вблизи промышленных объектов. Ученые рассматривают различные методы рекультивации засоленных почв, среди которых можно выделить три направления: повышение солеустойчивости растений, подбор растений (галофитов) и повышение биогенности техногрунтов. Однако в регионах с суровыми климатическими условиями и низкой биологической продуктивностью методы восстановления требуют тщательного подбора, особенно на нарушенных почвах в горнодобывающей промышленности. Цель данной обзорной статьи заключается в том, чтобы, используя доступные литературные данные, осветить основные методы рекультивации территорий, пострадавших от засоления в горнодобывающей промышленности, особенно в условиях Крайнего Севера.

Ключевые слова: деградация почв, засоление, вторичное засоление, Крайний Север, солеустойчивость, галофиты, увеличение биогенности.

DOI: 10.46573/2658-5030-2025-3-80-93

ВВЕДЕНИЕ

Почвы с преобладанием в химическом составе легкорастворимых минеральных солей, концентрации которых губительны для растений ($>0,25\%$), называются *засоленными*. Это основной фактор деградации почв, уменьшающий количество плодородных почв [1]. Классификация почв по количеству в них солей представлена на рисунке.



Классификация почв по степени засоления [2]

При рассмотрении вопросов деградации почв современными отечественными исследователями во главе с Э.Н. Молчановым совместно с иностранными учеными, также рассматривающими данную проблему, на основе апробированных ранее подходов к классификации деградируемых почв выделены основные виды деградации, представленные в табл. 1 [3].

Таблица 1. Основные виды деградации почв, общее количество и их прирост в период с 2018–2020 гг. [3]

Вид деградации	Общее количество, млн га	2018 г.	2019 г.	2020 г.
		тыс. га		
Ветровая эрозия	210	1 252	1 643	1 136
Водная эрозия	235	2 048	2 467	2 467
Засоление	172	241	277	235
Переувлажнение	197	722	849	830

Данные процессы негативного изменения почвенного покрова в большей степени связаны с антропогенным вмешательством человека. В связи с интенсификацией процессов деградации почвенного покрова увеличивается количество постов мониторинга для наблюдения за состоянием почв и прогнозирования их качественного и количественного изменения [3, 4].

Мониторинг большинства процессов деградации совершенствуется с каждым годом, однако вести наблюдение за засоленными почвами и их учет наиболее затруднительно. Связано это с тем, что процесс засоления-рассоления динамичен [5, 6]. Рассматривая проблему засоления почв в РФ, Е.И. Панкова (2020) акцентирует внимание на том, что учетные данные устарели (материалы не обновлялись с середины 80-х годов прошлого века) и отсутствует общепринятая методика, учитывающая количество легкорастворимых солей в слоях почв для установления категории засоленности [1, 7].

С увеличением количества солей в почве растения, получая питательные вещества при помощи корней, угнетаются: кутикула (защитный слой поверхности листьев) становится более тонкой, на листьях появляются ожоги, наступает некроз внешних краев листьев [8]. Изменяется и мембранный потенциал, за счет чего в клетки растений поступает ион Na^+ , замещая поступление ионов K^+ в калиевых каналах [9, 10].

И.К. Сабольч отмечает, что количество засоленных почв составляет 950 млн га (естественное, первичное засоление), Г. Меттернхт приводит количество вторично засоленных почв – 77 млн га. Согласно данным ООН, содержащимся в докладе о «Состоянии мировых земельных и водных ресурсов для производства продовольствия и ведения сельского хозяйства», общее количество засоленных почв ежегодно увеличивается на 1,5 млн га [11, 12].

Сегодня количество таких почв составляет более 25 % от поверхности суши Земли (>20 млн km^2). В РФ процессу засоления подвержено свыше 20 % сельскохозяйственных (>40 млн га) угодий и свыше 10 % (>170 млн га) земель от общего количества земель.

На Крайнем Севере количество земель, подверженных процессам засоления, составляет 34 млн га, или 6,2 % земель данной территории (550 млн га). Основными центрами засоления в пределах Крайнего Севера являются:

Арктическое побережье Евразии и острова с варьированием солености от 0,05 до 2 %, при этом в некоторых горизонтах наблюдается засоление вплоть до 6 %;

долина реки Лены (Центральная Якутия), где засоленные почвы (в среднем 2 %, в некоторых горизонтах засоление может достигать 8 %) формируются за счет превышения испарения над количеством осадков и увеличения количества солей континентального типа [13, 14].

Площадь угодий, подверженных данной деградации, но при этом способных войти в сельскохозяйственный оборот, достигает 340 млн га по всему миру, порядка 12 млн га из которых приходится на территорию Крайнего Севера, где основой сельского хозяйства является разведение и выпас оленей.

Значительное влияние на распространение солей в почве оказывает их физический состав. Согласно данным Индонезийского агентства сельскохозяйственных исследований и разработок, на песчаных побережьях после их продолжительного затопления морской водой засоление проявляется незначительно в связи с высоким уровнем просачиваемости и слабых соединительных свойств песчаных почв, в отличие от глинистых пород [11].

Данные суждения справедливы и для Арктического побережья, где выявлена прямая зависимость количества солей в мерзлых грунтах от физического состава последних. Содержание легкорастворимых солей в песчаных породах до 8 раз меньше по сравнению с глинистыми. В песках соленость варьируется от 0,2 до 0,5 %, в супесях, суглинках и глинах изменяется в пределах от 0,4 до 2,1 % [15, 16].

Под влиянием солей происходят изменения биохимических характеристик растений за счет биосинтеза совместимых метаболитов (различных низкомолекулярных веществ – аминокислот, моносахаридов, спиртов), при этом рост синтеза определенных гормонов благоприятствует дисбалансу между их концентрациями. В итоге осуществляются глубокие изменения, способствующие модификациям фотосинтеза [6, 17].

Накопление солей также связано с гранулометрическим составом почвы – соотношением почвенных частиц разного диаметра [18]. Увеличение мелкой фракции почвенных частиц приводит к увеличению их эффективного диаметра, а значит, к изменению физических параметров, и профиль уменьшения или накопления солей будет характеризоваться водной плоскостью [19, 20].

Вопрос засоления почв актуален при добыче не только солей, но и других полезных ископаемых. На территориях Западной Якутии и ее алмазоносной провинции распространены насыщенные рассолы метегро-ичерского водоносного комплекса, залегающие в горных породах под слоем многолетнемерзлых пород. Их средняя минерализация варьируется от 35 до 294 мг/л, причем данный показатель увеличивается с глубиной. В Западной Якутии почвы и грунты характеризуются слабым типом засоления [21].

О.В. Шадринова отмечает, что первичное засоление имеет слабо выраженный характер (сульфатный/сульфатно-хлоридный) с последующим формированием поверхностного засоленного горизонта [22]. При миграции солей по профилю происходит формирование надмерзлотного солевого горизонта, служащего источником вторичного засоления почв [22, 23].

В Республике Саха (Якутия) общая площадь засоленных почв составляет более 9,5 тыс км² [9]. Наибольшая часть деградированных земель расположена в Западной Якутии, являющейся центром алмазодобычи.

На коренном алмазном руднике «Удачный» были обнаружены подземные рассолы, проникающие в трещинно-поровое пространство в глубокозалегаемых горизонтах и отличающиеся высокой минерализацией (>600 г/дм³) [24]. Вследствие разработки данного месторождения происходит как откачка данных рассолов с последующей закачкой их в толщи отработанных шахт либо с поднятием их на поверхность, так и извлечение вскрышных пород на поверхность с формированием отвалов/хвостохранилищ с высоким показателем засоленности. На сегодняшний день из данного месторождения было извлечено свыше 380 млн м³ вскрышных пород [20].

В Мирнинском районе, включающем более 0,5 тыс. га засоленных почв, распространены такие свиты в пределах кимберлитовых полей, в которых соленасыщенность составляет 60...85 %. Солесодержащие породы приобретают особые реологические свойства, что проявляется в виде интенсивной ползучести. Это затрудняет процессы извлечения и способствует просачиванию солей из толщ отвалов/хвостов в почвы с формированием новых почв – хемоземов [25, 26]. Основными ионами засоления служат хлорид- и сульфат-ионы [27, 28].

Стоит отметить, что засоление как верхних, так и нижних профилей почвы с многолетнемерзлыми породами способствует их трансформации из твердомерзлого состояния в пластично-мерзлое и немерзлое состояние [24, 29].

В данной обзорной статье, используя доступные источники, осветим используемые методы рекультивации территорий (прежде всего Крайнего Севера), пострадавших от засоления в горнодобывающей промышленности.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве материалов исследования были использованы публикации в научных журналах, в той или иной мере затрагивающие тему техногенного засоления почв, в том числе в районах Крайнего Севера.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для того чтобы приблизить плодородный потенциал нарушенных земель к показателям, присущих им до начала антропогенного использования, в период проведения восстановительных (рекультивационных) мероприятий необходимо контролировать и регулировать химический, водный, тепловой, питательный и другие режимы [30, 31].

В.О. Лапинская выделяет семь основных методов снижения засоления (табл. 2).

Таблица 2. Основные методы снижения засоления [32]

№	Метод	Описание
1	Рассоляющий дренаж	Применяется на участках, где необходимо углубить уровень грунтовых вод, в засушливых регионах
2	Удаление солей механическим путем	Удаление солевой корки солончаков / сильнозасоленных почв при помощи специализированной техники
3	Запашка солей	Проводится на слабозасоленных почвах при наличии мощного гумусового горизонта и при условии, что в глубине профиля соли не распространены. Осуществляется путем вспахивания нарушенного участка
4	Промывка поверхностного слоя	Промывка корнеобитаемого слоя тяжелых почв с низкой водопроницаемостью и высоким содержанием солей в данном слое. Объем забора воды до 30 тыс. м ³ /га
5	Вымывание солей	Применяется на слабозасоленных почвах с глубоким уровнем грунтовых вод. При этом многолетние растения должны быть устойчивы, а для новых саженцев созданы оптимальные условия на первых этапах вегетации

Окончание табл. 2

№	Метод	Описание
6	Сквозная промывка	Вымывание легкорастворимых солей со всей толщи почвенного горизонта с последующим их переносом в грунтовые воды и их своевременное удаление при помощи дренажа (искусственного/естественного)
7	Биологическая рекультивация	Предполагает закрепление почвенного слоя при помощи корневой системы выращиваемых растений для снижения ветровой/водной эрозии с восстановлением ландшафта (возможно использование галофитов, специальных ферментов, клубеньковых бактерий, различных удобрений и т.д.)

В районах Западной Сибири в связи с продолжительными и холодными зимами с избыточным количеством снеговых осадков предполагается применение дренажных систем наряду с гипсованием и использованием растений-галофитов.

Планируется зимой накапливать воду в виде снега, а с наступлением весны использовать накопленный ресурс для промывки почв. М.В. Носова предполагает, что в течение теплого периода года поступающая дождевая вода и система «рассоляющих дренажных канав» будут способствовать горизонтальной миграции легкорастворимых солей в верхних профилях почвы и стабилизировать их концентрацию [33].

Запашка засоленных грунтов неэффективна вследствие того, что соли распространены по всему профилю и удаление солевых корочек в случае их формирования будет способствовать ветровой эрозии, а вымывание, промывание ведут к просачиванию легкорастворимых солей в поверхностные горизонты, на которых и происходит складирование вскрышных пород [6]. Биологический этап рекультивации включает в себя комплекс агротехнических и фитомелиоративных мероприятий, нацеленных на снижение засоленности и приведение техногенно нарушенных земель в состояние, близкое к естественному [34].

Данные критерии справедливы и для регионов Крайнего Севера, но с некоторыми оговорками. Так, при попытке промывания и вымывания солей будет изменяться уровень многолетнемерзлых пород, увеличиваться количество пластично-мерзлых почв, а соли мигрируют в соседние почвы с образованием хемоземов [35, 36].

В ходе анализа источников установлено, что в своей основе методы рекультивации засоленных территорий можно разделить на следующие три направления.

1. Повышение солеустойчивости растений

Галобиомы – комплекс генов галофитов, активно изучаются с целью выделения генов отвечающих за их устойчивость к солесодержанию в почве. Некоторые из таких генов способны перекодировать ферменты, принимающие участие в формировании осмопротекторов и авкапоринов, антиоксидантов и нескольких видов бактерий [37, 38].

Ярким примером галобиомов служат такие растения, как ежовник солончаковый (*S. salsa*), прибрежница (*Aeluropus littoralis*), люцерна посевная (*Medicago sativa*) [39]. Изучение генетической цепочки данных растений позволяет создавать связи, более устойчивые к высоким содержаниям солей в почве. Так, опытным путем доказано, что трансплантация генов, отвечающих за регулировку течения Na^+ в рис посевной (*Oryza*

sativa) и томат (*Solanum esculentum*) с последующим добавлением *NaCl* способствует увеличению сухого вещества.

С.Я. Семененко, изучая изменение засоленности почвы при ее рекультивации, проводил эксперимент, связанный с внесением в деградированные почвы ферментативного комплекса (*HC-Zyme*), представляющего собой смесь ферментов, относящихся к классу оксигеназ и синтезируемых из сахарной свеклы [39]. В результате лабораторного исследования была установлена положительная тенденция к снижению солесодержания в почве при использовании ферментативной биостимуляции растений, а также определена пограничная концентрация данного вещества, составляющая 7,5 мг/л.

Е.О. Симоновой с соавторами [40] рассматривалась возможность повышения устойчивости растений к климатическим условиям Крайнего Севера и засоленности почв с применением ассоциативных микроорганизмов рода *Achromobacter* (грамотрицательная, оксидазо- и каталазоположительная палочковидная бактерия). При внесении биодобавки с содержанием данного микроорганизма в почвы с хлоридным типом засоления наблюдалось увеличение прорастания семян на 40 %, длина ростков увеличилась на 59 %, их масса стала вдвое больше, на 13,5 % увеличилась корневая масса растений.

2. Подбор стрессоустойчивых растений (галофитов)

В Арктической части России и на Крайнем Севере, особенно у берегов Белого и Печорского морей, широко распространены, в частности, следующие растения-галофиты: злаковые (*Poaceae*) – 26 видов, осоковые (*Cyperaceae*) – 17 видов, астровые (*Asteraceae*) – 8 видов [41]. Сравнительная характеристика различных растений-галофитов представлена в табл. 3.

Таблица 3. Перспективность использования растений-галофитов в условиях Крайнего Севера [составлено авторами]

№	Название растения	Устойчивость к засолению	Устойчивость к климатическим условиям Крайнего Севера
1	Индигофера (<i>Indigofera</i>)	Устойчиво к хлоридным и сульфатным засолениям, азотфиксатор	Неморозостойкое, применяется в тропическом и умеренном типах климата
2	Ежовник солончаковый (<i>S. salsa</i>)	Абсорбирует и накапливает в себе соли различного типа и увеличивает количество общего азота	Неморозостойкий, распространен в европейской части России, Азербайджане, Иране и Центральной Азии
3	Лисохвост луговой (<i>Alopecurus pratensis</i>)	Устойчив к высоким показателям засоленности континентального типа	Характерные ареалы распространения – зоны лесотундры и тундры, переносит суровые зимы
4	Мискантус «Сорановский» (<i>Miscanthus sacchariflorus</i>)	Пригодный тип засоления: солонцы мелкие остаточные, намного хуже произрастает на солонцах средних малонатриевых	Морозоустойчив, способен переносить температуру до -30°C

3. Увеличение биогенности техногрунтов

Увеличение биогенности деградированных (подвергшихся засолению) почв достигается путем прироста активности микробиологических процессов [42].

Н.Н. Богатырева, рассматривая возможность применения хвостов фосфоритов для снижения засоленности почвы, разработала натуральный и безопасный мелиорант, в состав которого вошли глауконитсодержащие хвосты обогащения фосфоритов, молотая сера и активированный торф с содержанием гумусовых кислот в количестве 50 г/дм³. Основным компонентом фосфоритов является минерал глауконит (содержание до 70 %), обладающий хорошей сорбционной и ионообменной способностью и увеличивающий микробиологическую активность почв [41].

При внесении в почву от 8 до 10 т/га такого мелиоранта уже через неделю было зарегистрировано снижение засоленности в 4 раза. Однако данный метод применим только для почв с содовым (карбонатным) типом засоления.

Положительное влияние на сокращение засоленности оказывает и применение в качестве мелиорантов коагулянтов – фосфогипсов, карналлитов и твердых осадков очистки вод (артезианских и поверхностных).

Экспериментальным путем установлены необходимые концентрации мелиорантов:

для фосфогипса наибольшая фильтрационная способность достигается при внесении 1,0 г на 40 г почвы на засоленных почвах сульфатно-карбонатного типа;

для карналлита наилучшая фильтрационная способность достигается на солонцах нейтрального типа при концентрации 0,6 г на 80 мл;

твёрдые осадки очистки артезианских вод также обладают наилучшей фильтрационной способностью на солонцах нейтрального типа при равных дозах внесения с карналлитами, количество фильтрата составило 90 мл [43].

В Ямalo-Ненецком автономном округе рассматривали возможные приемы совершенствования биологического этапа рекультивации для повышения биогенности почв.

Органогенный горизонт выполняет основную роль в продуктивном восстановлении деградированных почв. В ЯНАО он имеет малую мощность (не достигает 7 см) и полностью разрушается при техногенной нагрузке.

При рекультивации карьера нефтегазового месторождения, подвергшегося засолению вследствие откачки межпластовых вод на поверхность и выноса легкорастворимых солей (хлоридов) из шламовых амбаров был создан органогенный слой внесением торфа в количестве 1,3 тыс. м³/га вместе с известковыми удобрениями (доломитовой мукой) в количестве 7 т/га для снижения кислотности торфа и повышения содержания доступных для растений фосфатов, общего азота и калия.

Основным показателем при восстановлении нарушенных земель является наращивание корневой массы. По окончании опыта удалось достичь показателя в 84,7 % в горизонте 0–20 см по отношению к горизонту 0–30 см [43, 44].

На месторождении «Айхал», расположенному в удаленном от транспортной инфраструктуры районе, в связи с отсутствием плодородных почвенных слоев была предпринята попытка увеличения биогенности техногенных почв.

Наиболее успешными из проводимых опытов считаются:

1. Использование старики (прошлогодней луговой травы). Старика представляет собой укрывной материал, защищающий от дефляции, и способна накапливать влагу

при поливах и дождях. Когда начинаются процессы гниения, она является источником питательных веществ [18, 23, 31]. Данный способ экономически выгоден. По итогам эксперимента фиксировалось проективное покрытие 40 %, высота травостоя достигла 35 см.

2. Использование осадков канализационных очистных сооружений с площадки карьера «Юбилейный». В их состав входит смесь из воды, в которой биологически безвредные вещества прочно связаны с загрязняющими токсичными компонентами органической и неорганической природы. Проективное покрытие достигло 50 %, а высота травостоя – 30 см [45].

Неоднозначными по конечному результату являются методы биологической рекультивации на отвалах и хвостохранилищах Мирнинского горно-обогатительного комбината. Работы проводились с отсыпкой поверх токсичных грунтов плодородных пород, завезенных с месторождения «Водораздельные галечники». Отвал № 6 карьера «Мир» частично отсыпался данными породами с внесением аммофосных удобрений [45].

Ориентируясь на успех рекультивации отвала, компания АК «АЛРОСА» приняла решение применить данный опыт к хвостохранилищу № 3. Поверх токсичных грунтов произвели отсыпку плодородных пород с внесением аммофосных удобрений, которые оказывают благоприятное воздействие на развитие растений в начальный период, повышают их устойчивость к кратковременным заморозкам.

В первые годы восстановление проходило по плану, однако содержание солей в техногрунтах оказалось слишком высоким, в связи с чем данные породы трансформировались в токсифабрикаты из реагентов. Для хвостохранилищ характерны малая зарастаемость и недостаточное количество опада, благотворно влияющего на увеличение биогенности. Основным способом решения данной проблемы является изолирование/консервирование подверженного загрязнению техногрунта материалом, препятствующим капиллярной транспортировки влаги и содержащимся в ней солей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выделено три направления рекультивации почв, подвергшихся засолению: повышение солеустойчивости растений, подбор стрессоустойчивых растений (галофитов) и увеличение биогенности техногрунтов.

Повышение солеустойчивости растений в большей степени основано на изучении генов галофитов, задействованных в способности растений произрастать на засоленных почвах, и исследовании почвенных бактерий некоторых видов растений, повышающих устойчивость растений к засолению. Можно сделать вывод о том, что исследователями предпринимаются попытки в первую очередь адаптироваться к сложившейся ситуации, а не пытаться улучшить химический и микробиологический состав почв.

Подбор стрессоустойчивых растений (галофитов) так же, как и повышение солеустойчивости, направлен на выявление и создание видов растений, способных адаптироваться к засолению почвы. Стоит отметить, что данный метод требует меньше затрат, так как подразумевает посадку растений на деградированном участке и их последующий мониторинг.

Повышение биогенности техногрунтов – комплексное и наиболее сложное направление из всех представленных. Связано это с тем, что данные методы рекультивации используются как для снижения количества солей в почве с

целью ее обратного введения в сельскохозяйственный оборот, так и просто для восстановления первичных почвенных показателей (химических). Исследователями рассматриваются различные способы повышения биогенности: применение удобрений на основе фосфора как мелиорант-коагулянта, торфа вместе с доломитовой мукой и т.д.

Таким образом, в связи с ростом количества засоленных земель вопрос их рекультивации стоит весьма остро. Экстракция вод и вскрытых пород, в профиле которых присутствуют соли, на поверхность с формированием отвалов и хвостохранилищ агрессивно воздействует на верхние горизонты почв, снижая их плодородие.

Засоление способствует процессам образования термокарста, термоэрозии и солифлюкции, за счет чего углубляется уровень вечной мерзлоты, а верхние горизонты переходят из мерзлого (твёрдого) состояния в пластично-мерзлое и немерзлое. Без проведения рекультивации на территориях Крайнего Севера углубление вечной мерзлоты приведет к разрушению сложившейся природной среды.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (FSRW-2024-0005).

ЛИТЕРАТУРА

1. Панкова Е.И. Засоленные почвы России: решенные и нерешенные проблемы // *Почвоведение*. 2015. № 2. С. 131–144.
2. О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2020 году: Государственный доклад. М.: Минприроды России; Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, 2021. 864 с.
3. Phillips J.D. Soil Complexity and Pedogenesis // *Soil Science*. 2017. V. 182. № 4. P. 117–127.
4. Атаева Г.И., Атаева З.А. Современные методы борьбы с засолением сельскохозяйственных земель // *Вестник науки и образования*. 2022. № 2 (122). Ч. 2. С. 66–68.
5. Панкова Е.И., Герасимова М.И., Королюк Т.В. Засоленные почвы в отечественной и международной классификации почв // *Почвоведение*. 2018. № 11. С. 1309–1321.
6. Kozlovskiy E.Y., Zhuravkov M.A. Determination and verification of the calculated model parameters of salt rocks taking into account softening and plastic flow // *Journal of Mining Institute*. 2021. V. 247. P. 1–7.
7. Панкова Е.И., Горохова И.Н. Анализ данных о площади засоленных почв в России в конце XX и начале XXI веков // *Бюллетень Почвенного института им. В. Докучаева*. 2020. № 103. С. 5–33.
8. Малышкин М.М. Рекультивация шламовых амбаров путем посадки растений // *Записки Горного института*. 2007. Т. 170. С. 119–120.
9. Zamora Re M., Tomasek A., Hopkins B.G., Sullivan D., Brewer L. Managing Salt-affected Soils for Crop Production // *Pacific Northwest extension publishing*. Technical Report April, 2022. 24 p.
10. Иванищев В.В. О механизмах солеустойчивости растений и специфических эффектах засоления // *Труды Тульского государственного университета. Естественные науки*. 2019. Вып. 4. С. 74–88.

11. Bannari A., El-Battay A., Hameid N., Tashtoush F. Salt-Affected Soil Mapping in an Arid Environment Using Semi-Empirical Model and Landsat-OLI Data // *Advances in Remote Sensing*. 2017. V. 6. № 4. P. 260–291.
12. Metternicht G., Azinck J. Remote sensing of soil salinity: potentials and constraints // *Remote Sensing of Environment*. 2003. V. 85. № 1. P. 1–20.
13. Tóth T., Pastor L., Kabosz S., Kuti L. Saline soils of Hungary: distribution prediction based on hydrogeological maps // *Ecology and geography of soils* / Ed. P.V. Krasilnikov. Petrozavodsk: Karelian Scientific Center of RAS, 2009. P. 116–157.
14. Тихановский А.Н. Проблемы и методы биологической рекультивации техногенно нарушенных земель Крайнего Севера // *Успехи современного естествознания*. 2017. № 2. С. 43–47.
15. Torabi M. Physiological and biochemical responses of plants to salt stress // *The 1st International Conference on New Ideas in Agriculture*. 2014. P. 26–27.
16. Азарова С.В., Усманова Т.В., Межибор А.М. Экологические проблемы мест захоронения отходов горнодобывающей промышленности в России // *Обзоры по загрязнению окружающей среды и токсикологии*. 2019. Т. 247. С. 59–84.
17. White K.D. Nature and Economy in the Aral Sea Basin. // *The Aral Sea: The Devastation and Partial Rehabilitation of a Great lake*. / Eds. Micklin P., Aladin N. and Plotnikov I. Heidelberg: Springer, 2014. Chapter 12. P. 301–335.
18. Petrova T.A., Rudzisha E., Alekseenko A.V., Bech J., Pashkevich M.A. Rehabilitation of Disturbed Lands with Industrial Wastewater Sludge // *Minerals*. 2022. V. 12. № 3. 19 p.
19. Hulisz P., Pindral S., Kobierski M., Charzyński P. Technogenic Layers in Organic Soils as a Result of the Impact of the Soda Industry // *Eurasian Soil Science*. 2018. V. 51. № 10. P. 1133–1141.
20. Kashnikov Yu.A., Ermashov A.O., Efimov A.A. Geological and Geomechanical Model of the Verkhnekamsk Potash Deposit Site // *Journal of Mining Institute*. 2019. № 237. P. 259–267.
21. Легостаева Я.Б., Шадринова О.В. Миграция солей в почвенном профиле и технопочвах в зоне влияния алмазодобывающих предприятий Якутии // *Геология и минерально-сырьевые ресурсы Северо-Востока России: Материалы X Всероссийской научно-практической конференции с международным участием*. Якутск: СВФУ, 2020. С. 478–481.
22. Шадринова О.В. К вопросу засоления почв на территории алмазодобычи (Западная Якутия) // *Почва как связующее звено в функционировании природных и антропогенно-трансформированных экосистем: Материалы V Международной научно-практической конференции*. Иркутск: ИГУ, 2021. С. 564–567.
23. Алексеев С.В., Алексеева Л.П., Гладков А.С., Трифонов Н.С., Серебряков Е.В. Рассолы из глубоких горизонтов трубы Удачная // *Геодинамика и тектонофизика*. 2018. Т. 9. № 4. С. 1235–1253.
24. Serebryakov E.V., Gladkov A.S. Geological and structural characteristics of deep-level rock mass of the Udachnaya pipe deposit // *Journal of Mining Institute*. 2021. № 250. P. 512–525.
25. Данилов П.П., Савинов Г.Н. Сравнительная характеристика техногенных трансформаций почв и почвенного покрова Вилюйского и Приленского плато при добыче алмазов // *Проблемы региональной экологии*. 2018. № 5. С. 134–137.

26. Афанасиади К.И., Смирнов Ю.Д. Технология защиты нанесенного плодородного слоя от минерализованных вод хвостохранилища АК «Алроса» при рекультивации // *Проблемы геологии и освоения недр: Труды XXI Международного симпозиума имени академика М.А. Усова студентов и молодых ученых, посвященного 130-летию со дня рождения профессора М.И. Кучина*. Томск: ТПУ, 2017. Т. 1. С. 698.
27. Афанасиади К.И. Оценка эффективности рекультивации хвостохранилища Мирнинского горно-обогатительного комбината // *Проблемы геологии и освоения недр: Труды XXI Международного симпозиума имени академика М.А. Усова студентов и молодых ученых, посвященного 130-летию со дня рождения профессора М.И. Кучина*. Томск: ТПУ, 2017. Т. 1. С. 696–697.
28. Шац М.М. Экологическая и геокриологическая специфика в недропользовании в Северной Сибири // *Жизнь Земли*. 2020. Т. 42. № 1. С. 24–37.
29. Петрова Т.А., Епишина А.Д. Эколого-экономические последствия аварий на калийных предприятиях // *Природные и техногенные риски. Безопасность сооружений*. 2024. № 4 (71). С. 37–40.
30. Лапинская В.О. Пути снижения засоления земель в районах разработки калийных месторождений. URL: http://science.kuzstu.ru/wpcontent/Events/Conference/Other/2014/eko/SE_2014/pages/Articles/Lapinskaya (дата обращения: 01.03.2023).
31. Петрова Т.А., Рудзиш Э.Р. Рекультивация техногенно-нарушенных земель с использованием осадков сточных вод в качестве мелиорантов // *Записки Горного института*. 2021. Т. 251. С. 767–776.
32. Alekseenko V.A., Shvydkaya N.V., Alekseenko A.V. [et al]. Element accumulation patterns of native plant species under the natural geochemical stress // *Plants*. 2020. V. 10. № 1. URL: https://www.researchgate.net/publication/347981126_Element_Accumulation_Patterns_of_Native_Plant_Species_under_the_Natural_Geochemical_Stress (дата обращения: 25.02.2025).
33. Носова М.В., Середина В.П. Инновационный подход к рекультивации техногенно-засоленных почв Западной Сибири // *Утилизация отходов производства и потребления: инновационные подходы и технологии: Материалы II Всероссийской научно-практической конференции*. Киров: ВятГУ, 2020. С. 308–312.
34. Пашкевич М.А., Петрова Т.А., Рудзиш Э. Оценка возможности использования лигнинового шлама для лесохозяйственной рекультивации нарушенных земель // *Записки Горного института*. 2019. Т. 235. С. 106–112.
35. Palyanitsina A., Safiullina E., Byazrov R., Podoprigora D., Alekseenko A. Environmentally Safe Technology to Increase Efficiency of High-Viscosity Oil Production for the Objects with Advanced Water Cut // *Energies*. 2022. V. 15. № 3. P. 753.
36. Опекунова М.Г., Опекунов А., Кукушкин С.Ю., Арестова И.Ю. Оценка трансформации природной среды в районах освоения углеводородов на севере Западной Сибири // *Сибирский экологический журнал*. 2018. № 25 (1). С. 122–138.
37. Иванищев В.В. Новые направления исследований в повышении солеустойчивости растений // *Известия Тульского государственного университета. Естественные науки*. 2021. № 2. С. 47–55.
38. Song J., Wang B. Using euhalophytes to understand salt tolerance and to develop saline agriculture: *Suaeda salsa* as a promising model // *Annals of Botany*. 2015. V. 115. № 3. P. 541–553.
39. Семененко С.Ю., Морозова Н.В. Изменение содержания солей в почве при ее рекультивации методом ферментативной биостимуляции // *Аграрный научный журнал*. 2018. № 1. С. 35–38.

40. Симонова Е.О., Субботин А.М., Петров С.А. Повышение устойчивости растений к неблагоприятным факторам внешней среды под влиянием бактерий из многолетнemerзлых пород // *Материалы II Международного симпозиума «Молекулярные аспекты редокс-метаболизма растений» и Международной научной школы «Роль активных форм кислорода в жизни растений»* / ред. И.В. Максимов и др. Уфа: ООО «Первая типография», 2017. С. 413–416.

41. Богатырева Н.Н., Потапова И.А., Сырчина Н.В. Мелиорант на основе хвостов обогащения фосфоритов для восстановления плодородия содово-солонцовых почв // *Экология родного края: проблемы и решения: Материалы XVI Всероссийской научно-практической конференции с международным участием*. Киров: ВятГУ, 2021. Кн. 1. С. 441–444.

42. Сырчина Н.В., Ашихмина Т.Ю., Богатырева Н.Н., Кантор Г.Я. Глаукониты Вятско-Камского фосфоритоносного бассейна // *Теоретическая и прикладная экология*. 2020. № 2. С. 117–122.

43. Ямалиев Т.Ш., Бочарова А.А. Технологии биологической рекультивации нарушенных земель в условиях Крайнего Севера // *Инновационное развитие агропромышленного комплекса для обеспечения продовольственной безопасности Российской Федерации: Сборник материалов Международной научно-практической конференции*. Часть 2. Тюмень: ГАУ Северного Зауралья, 2020. С. 592–597.

44. Никифоров А.А., Миронова С.И., Иванов В.В. О необходимости биологической мелиорации в условиях Севера // *Успехи современного естествознания*. 2018. № 2. С. 119–123.

45. Пашкевич М.А., Левчук И.Р. Разработка экологически безопасных способов хранения и захоронения минеральных отходов горно-металлургического производства // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2011. № 11. С. 138–140.

Для цитирования: Данилов А.С., Кремчев Э.А. Техногенное засоление почв на Крайнем Севере: обзор проблем и потенциальных решений // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2025. № 3 (27). С. 80–93.

TECHNOGENIC SOIL SALINIZATION IN THE FAR NORTH: A REVIEW ON CHALLENGES AND POTENTIAL SOLUTIONS

A.S. DANILOV¹, Cand. Sc., E.A. KREMCHEEV², Dr. Sc.

¹Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University,
2, 21 liniya V.O., St. Petersburg, 199106, e-mail: Danilov_AS@pers.spmi.ru

²National research university "High school of economics",
16, Soyuza Pechatnikov st., St. Petersburg, 190121, e-mail: kremcheev@mail.ru

Salinization is considered as a major factor that have negatively affected over 1 billion hectares of soils among the world and persist with a growth rate of 1.5 million hectares per year. The problem of salinity is primarily associated with agricultural land in arid zones, however, mining enterprises also increase the amount of saline soils by extracting brines and overburden to the surface. Salinization processes in the Arctic regions

of Russia are more acute, since salts contribute to the development of thermokarst, thermal erosion and solilux processes, due to which the level of permafrost deepens and chemozems are formed near industrial sites. Scientists are considering various methods of recultivation of saline soils, which can be divided into three areas: increasing the salt tolerance of plants, selecting stress-resistant plants (halophytes) and increasing the bio-genicity of techno-soils. However, in the Arctic regions with harsh climatic conditions and low biological productivity, restoration methods require careful selection, especially on disturbed soils in the mining industry. In this connection the purpose of this review article is to use available sources and published literature on soil salinisation in general, and particularly in the Far North, to highlight available methods for reclamation of areas affected by salinisation in mining.

Keywords: soil degradation, salinization, secondary salinization, Far North, salt tolerance, halophytes, biogenicity.

Поступила в редакцию/received: 21.04.2025; после рецензирования/revised: 27.04.2025;
принята/accepted: 30.04.2025

УДК 622.73

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ АГРЕГАТА ДЛЯ КОМПЛЕКСНОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ГОРНЫХ ПОРОД, ОБЛАДАЮЩИХ ПЛАСТИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ

И.В. ГОРЛОВ¹, д-р техн. наук, П.Е. МИТУСОВ², канд. техн. наук

¹Тверской государственный технический университет,
170026, Тверь, наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: gorloviv@yandex.ru
²Московский научно-исследовательский проектно-изыскательский институт
технологий и инноваций, 117105, Москва, Нагатинский 1-й пр., 4

© Горлов И.В., Митусов П.Е., 2025

Статья содержит анализ типовых агрегатов для классификации и измельчения материалов. Предложен комплексный агрегат нового типа, который может использоваться для переработки слабых горных пород, обладающих выраженными пластическими свойствами, и позволит осуществлять в рамках единого цикла как измельчение, так и классификацию исследуемых материалов, исключая дополнительную транспортировку и промежуточное хранение продукта переработки. Описан принцип действия агрегата, также представлены некоторые элементы инженерных расчетов для определения наиболее важных технологических параметров при переработке указанных горных пород. Приведены результаты оценки эффективности процесса при использовании измельчителя-классификатора.

Ключевые слова: измельчение, классификация горных пород, энергетический метод, сдвиговые напряжения, вал-измельчитель, перфорированный барабан, эффективность.

DOI: 10.46573/2658-5030-2025-3-93-102

ВВЕДЕНИЕ

Горная промышленность во всем мире развивается в направлении повышения эффективности технологий добычи полезных ископаемых, а также их переработки. При создании горного оборудования в ряде случаев недостаточное внимание уделяется горным породам, обладающим средней и слабой прочностью с достаточно высокими пластическими свойствами. К таким породам можно отнести слабые известняки, гипс, мел, тальк и др. [1]. Использование традиционного технологического оборудования для переработки средних и слабых горных пород, характеризующихся существенными пластическими свойствами, может приводить к повышенному энергопотреблению при измельчении и классификации. Так, при измельчении каолиновых глин с использованием шаровых барабанных мельниц эффективность процесса помола может снижаться более чем на 40 % по сравнению с переработкой пород, которые не обладают пластическими свойствами.

Несмотря на низкую эффективность, на предприятиях для переработки слабых горных пород, обладающих пластическими свойствами, в большинстве случаев используется традиционное оборудование [2]. Такое оборудование хотя и имеет возможность решать достаточно широкий перечень технологических задач на основе типовых методов разрушения горных пород, но в рассматриваемом случае это приводит к значительному снижению эффективности процесса измельчения из-за завышенной металлоемкости и мощности типовых агрегатов и их неприспособленности для переработки пластичных горных пород. Следует отметить, что оборудование, предназначенное для переработки таких материалов, в нашей стране фактически не производится.

Следовательно, для повышения эффективности переработки пластичных горных пород слабой прочности необходимо разрабатывать специализированное оборудование, предназначенное для таких материалов.

АНАЛИЗ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТИПОВЫХ АГРЕГАТОВ ДЛЯ ПЕРЕРАБОТКИ ГОРНЫХ ПОРОД

Предприятия горной промышленности нашей страны для измельчения различных материалов используют широкий спектр технологического оборудования, которое воздействует на горную породу различными способами: разламыванием и раскалыванием; раздавливанием и истиранием с раздавливанием; ударом и ударом с истиранием; коллоидной обработкой и др. [3].

Кроме того, по Э.А. Хопунову [4], оборудование можно классифицировать по таким факторам воздействия на породу, как нагрузка, длительность нагрузки и место ее приложения. Анализ факторов воздействия показывает, что для существующих методов измельчения, как правило, трудно теоретически оценить энергетические затраты вследствие взаимного влияния одновременно действующих факторов. Исходя из данных, представленных в работе Э.А. Хопунова, для существующего измельчительного оборудования было установлено, что валковый пресс является наиболее перспективным агрегатом с точки зрения переработки слабых горных пород, обладающих существенными пластическими свойствами. Валковый пресс аналогичен валковой дробилке, но принцип воздействия на горную породу у них различен: в валковом прессе разрушение породы в большей мере происходит за счет взаимодействия измельчаемых элементов породы, что способствует эффективной

передаче энергии, необходимой для разрушения. Измельчение в валковых прессах осуществляется в закрытых объемах, что не позволяет отдельным частицам вырываться из зоны пластической деформации и, как следствие, обеспечивает относительно высокую производительность и уменьшение износа рабочих органов оборудования по сравнению с агрегатами других типов.

В большинстве типовых агрегатов для измельчения эффективность существенно снижается из-за того, что в зоне разрушения присутствуют частицы, которые не требуют дальнейшего измельчения, но продолжают измельчаться. Это приводит к переизмельчению и дополнительным затратам энергии. Таким образом, повышение эффективности переработки невозможно без внесения в конструкцию разрабатываемых комплексных агрегатов устройств для удаления кондиционных частиц из зоны разрушения.

После этапа измельчения получается продукт, содержащий частицы различных фракций, которые подвергаются дальнейшей классификации с разделением на фракции и отделением кондиционного продукта, при этом более крупные фракции отправляются на вторичную переработку. Для классификации горных пород могут использоваться специальные виды классификаторов (гидравлические, механические, пневматические, электрофизические, электромагнитные и др.).

Механические классификаторы обладают достаточно высокой производительностью, характеризуются относительно невысокими энергозатратами и обеспечивают качественное разделение продукта на фракции с помощью калиброванных сит или решеток. Такие классификаторы бывают циклического (грохоты) и непрерывного действия (барабанные классификаторы и др.).

Барабанные классификаторы имеют высокую производительность, могут использоваться для различающихся по свойствам пород и являются устройствами непрерывного действия. Кроме того, они могут применяться для классификации трудногрохотимых материалов, обладающих выраженными пластическими свойствами. Однако существенным недостатком таких классификаторов является снижение эффективности классификации из-за увеличения концентрации частиц мелких фракций в исходном материале. Для снижения негативного эффекта рядом ученых предложены выражения для теоретического анализа процесса классификации с получением рациональных режимов грохочения в барабанных классификаторах. Кроме того, необходимо учитывать, что интенсивность классификации понижается в процессе движения породы из зоны загрузочного окна в зону разгрузки, при этом концентрация частиц мелких фракций увеличивается возле центра циркуляции.

Для уменьшения затрат суммарной энергии при измельчении и классификации требуется провести теоретический анализ разрушения слабых горных пород, обладающих пластическими свойствами, выявить закономерности деформации при измельчении и разработать конструкцию комплексного агрегата – измельчителя-классификатора, с помощью которого можно повысить эффективность такого комбинированного процесса за счет использования синергетического эффекта.

МОДЕЛЬ ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЯ-КЛАССИФИКАТОРА

Анализ существующего дробильно-сортировочного оборудования показал, что в настоящее время отсутствует специализированное оборудование для измельчения и классификации слабых горных пород, обладающих пластическими свойствами, но есть

оборудование (валковые прессы и барабанные грохоты), на основе конструкций которого можно создать комплексный агрегат, измельчитель-классификатор, совмещающий технологические процессы измельчения и классификации, минуя промежуточное транспортирование и конвейерную перегрузку. Способ воздействия на перерабатываемую породу и конструктивные особенности данного агрегата дают возможность использовать его как для измельчения слабых горных пород, обладающих пластическими свойствами, так и для их классификации.

Для анализа процесса измельчения внутри барабана агрегата с помощью рабочего органа – вала-измельчителя необходимо создать расчетную модель такого процесса, которая будет соответствовать условиям деформации при разрушении пластичных материалов. Схема рабочего пространства предлагаемого устройства показана на рис. 1.

В области *A* при относительно невысоких нагрузках протекает процесс уплотнения частиц с формированием как упругих, так и пластических деформаций. На этом этапе происходит разрушение в первую очередь менее прочных фрагментов по наименее слабым сечениям или дефектам.

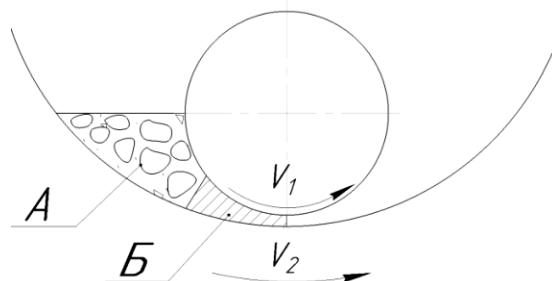


Рис. 1. Схема рабочего пространства агрегата для измельчения:
*V*₁ – направление касательной скорости рабочего органа – вала-измельчителя;
*V*₂ – направление касательной скорости рабочего органа – барабана
(*A* – область предварительного уплотнения горной породы;
B – область разрушения горной породы)

В настоящее время не существует отработанной методики определения затрат энергии на уплотнение материала, обладающего пластическими свойствами, но для решения различных задач по измельчению горных пород предложены модели расчетов, позволяющие с некоторой точностью провести оценку данного процесса. Так, модель для определения энергозатрат при уплотнении горной породы с помощью пресс-валкового агрегата для получения кубовидного щебня из сланцевой породы [6] показана на рис. 2.

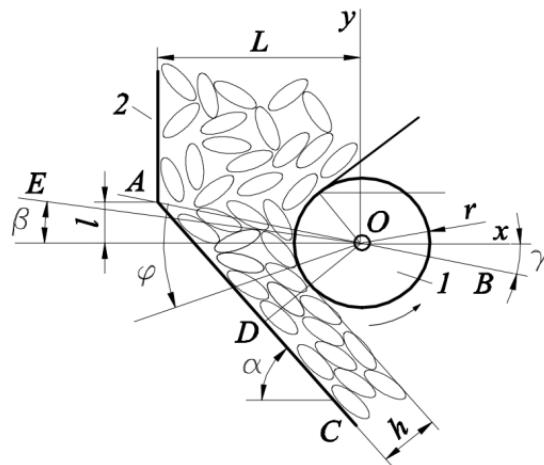


Рис. 2. Схема уплотнения породы в пресс-валковом агрегате

С целью выявления рациональных параметров агрегата провели анализ предложенной схемы. Было установлено, что сила, необходимая для уплотнения, зависит от расположения ролика 1 относительно корпуса бункера 2. Положение ролика определялось смещением его оси в горизонтальной плоскости на расстояние L и в вертикальной плоскости l относительно точки A . На рис. 2 использованы следующие обозначения:

- α – значение угла наклона нижней поверхности бункера;
- β – расчетный угол захвата породы;
- h – высота слоя уплотненной породы в направлении линии OD ;
- γ – угол наклона линии AB к горизонту ($\operatorname{tg} \gamma = l/L$).

На ролик действует распределенная нагрузка q , величина которой растет по мере приближения уплотненной массы к линии OD . При этом величину q , $\text{Н}/\text{м}^3$, можно представить как произведение коэффициента μ , отвечающего за экспериментально определяемые свойства материала (гранулометрический состав, формы и размеры частиц и др.), на изменение полярной координаты относительно точки O Δp ($q = \mu \Delta p$) (рис. 3).

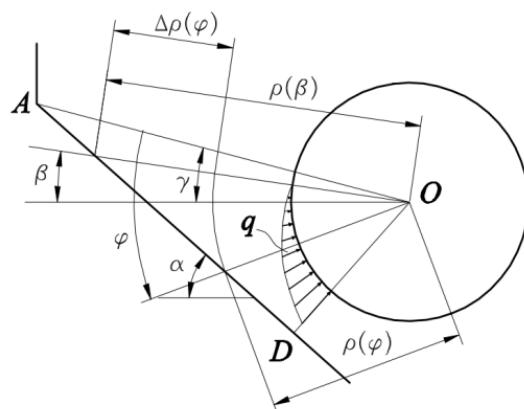


Рис. 3. Схема для расчета нагрузки

Получено выражение для определения силы, действующей на ролик 1 (см. рис. 2):

$$F = \mu' rb(h+r) \left(\frac{\pi/2 - \psi}{\sin \psi} + \ln \operatorname{tg} \frac{\psi}{2} \right),$$

где r и b – радиус и длина ролика соответственно;

$$\psi = \alpha - \gamma + \beta.$$

Анализ представленного выражения позволяет получить рациональные параметры проектируемого агрегата, но основной проблемой является нахождение коэффициента, определяющего свойства материала μ' .

Используя представленное выражение и предлагаемую модель комплексного агрегата при коэффициенте μ' , полученном для сланцевой породы, была установлена сила, действующая на ролик, и изменение зазора в зоне деформации, что дало возможность оценить с некоторой точностью затраты энергии на процесс уплотнения породы. На основе анализа приведенных данных было установлено, что рассматриваемый этап потребует сравнительно невысоких затрат энергии, поэтому при моделировании он не будет учитываться.

В области B уплотненная масса интенсивно разрушается за счет пластической деформации, анализ которой будем проводить с помощью приближенного энергетического метода. Необходимая для такой деформации мощность, которая рассчитывается с помощью этого метода, незначительно превышает величину действительной мощности внутренних сил для пластического формоизменения. Следовательно, полученное на основе энергетического метода давление, действующее на рабочие поверхности агрегата, является верхней границей для действительной величины.

Рядом исследователей установлено, что в условиях всестороннего сжатия пластичные горные породы ведут себя как жестко-идеально пластичные материалы [7, 8]. Тогда процесс разрушения пластичной горной породы в области B имеет некоторое сходство с деформацией листового металла при прокатке между двумя вальцами. Следовательно, при анализе пластической деформации могут быть использованы известные зависимости, полученные для жесткого идеально-пластичного материала в условиях плоской задачи [9].

При увеличении скорости V_1 относительно скорости V_2 результирующая скорость на разрыве блоков измельчаемого материала может совпасть с вектором главных касательных напряжений. Это существенно уменьшит затраты энергии на разрушение, вследствие чего снизится давление на рабочие поверхности перфорированного барабана и вала-измельчителя [10]. Было установлено, что при отношении V_1/V_2 около трех давление на рабочие поверхности барабана снижается более чем в полтора раза.

Теоретическая модель процесса разрушения горной породы, обладающей пластическими свойствами, позволила выявить основные закономерности процесса деформирования. Поскольку ограничения модели не дают возможности оценить с достаточной точностью эффективность измельчения, для проверки полученных результатов необходимо провести лабораторные испытания на физической модели комплексного агрегата.

ЭМПИРИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ

Теоретический анализ процесса разрушения слабых горных пород, обладающих пластическими свойствами, выявил влияние скоростей вращения рабочих органов на силовые параметры и, следовательно, на эффективность переработки материалов измельчителем-классификатором [20]. В то же время теоретическая модель, ввиду своих ограничений, не позволяет оценить в полной мере процесс измельчения слабых горных пород, обладающих пластическими свойствами, поэтому для проверки полученных закономерностей необходимо проведение стендовых испытаний. Для этих целей была использована принципиальная схема экспериментальной установки, показанная на рис. 4.

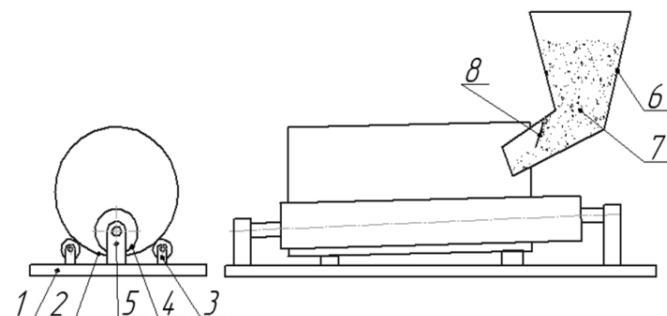


Рис. 4. Принципиальная схема экспериментальной установки

Конструкция установки для лабораторных исследований представляет собой основание 1 с установленным на роликах 3 перфорированным барабаном 2, внутри которого имеется вал-измельчитель 4, закрепленный на регулируемых опорах 5. Перфорации в барабане предназначены для отведения кондиционного измельченного продукта из зоны переработки. Дозирование исходного продукта 7 осуществляется при помощи бункера-дозатора 6 с управляемой заслонкой 8.

При проведении экспериментальных исследований использовался гипс Г2 ГОСТ125-2018, из которого в соответствии с технологией приготовления формировался брикет. Затем брикет подвергался дроблению и классификации с помощью сит. Для проведения экспериментов на комплексном агрегате использовался исходный продукт, в составе которого были частицы с размерами от 4 до 1 мм. Объем исходного продукта $0,02 \text{ м}^3$, время его переработки за три прохода остатка в среднем 42 мин, эксперимент повторялся 10 раз. Затраты энергии на обработку пробы по результатам эксперимента составили от 0,36 до 0,63 кВт·ч. Размер частиц готового продукта составил 0,3 мм.

Для оценки эффективности исследуемого процесса необходимо учитывать полную производительность Q_{Π} , с учетом объемной производительности Q_O и производительности по готовому продукту Q_{Γ} , %:

$$Q_{\Pi} = Q_O \cdot Q_{\Gamma} / 100.$$

Кроме того, на эффективность процесса влияет размер рабочих поверхностей агрегата. Для учета этого параметра рассчитывалась удельная мощность разруше-

ния ΔW как отношение мощности W , необходимой на измельчение (измерялась лабораторным ваттметром РСЕ-360), к квадрату диаметра рабочего органа d :

$$\Delta W = W / d^2.$$

Таким образом, эффективность переработки породы \mathcal{E} можно оценить как отношение удельной мощности ΔW к полной производительности процесса Q_{II} :

$$\mathcal{E} = \Delta W / Q_{II}.$$

Для измерения необходимой на измельчение электрической мощности при проведении лабораторных исследований на экспериментальной установке использовался ваттметр лабораторный РСЕ-360.

При проведении измерений электрической мощности требуется учитывать потери в передаточных механизмах установки, на основе предварительного анализа общий КПД экспериментальной установки был около 0,6. Точнее полученную величину устанавливать не требуется, так как методика измерений основывается на сравнении.

Измерения необходимой для измельчения мощности проводились на условиях наибольшей производительности, полученной на испытаниях. При теоретическом анализе процесса разрушения слабых горных пород, обладающих пластическими свойствами, было выявлено, что на рабочих поверхностях агрегата давление q наименьшее. Следовательно, минимальные затраты энергии при измельчении наблюдаются при соотношениях касательных скоростей вала-измельчителя и перфорированного барабана в интервале 2/1–3/1. В этом диапазоне проводились экспериментальные исследования, результаты которых показаны на рис. 5.

На основе анализа результатов эмпирического исследования влияния отношения величин касательных скоростей вала-измельчителя V_1 и перфорированного барабана V_2 было выявлено, что при их соотношении около 2,3/1 эффективность процесса измельчения для лабораторной установки увеличивается на 30 %.

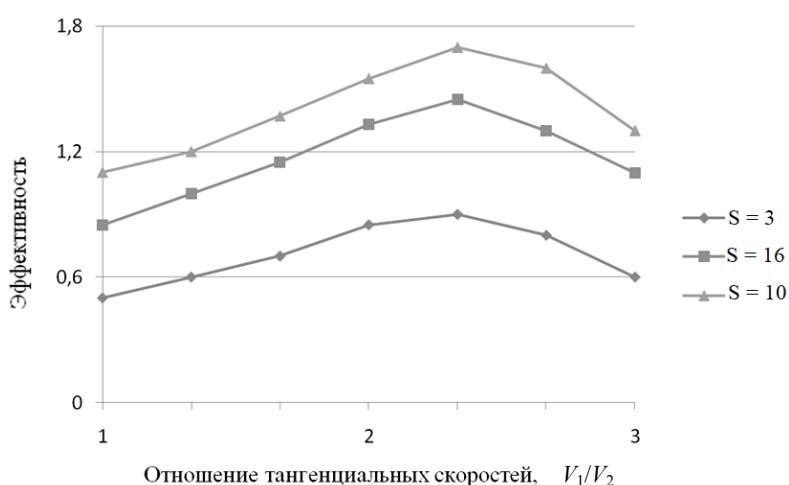


Рис. 5. Зависимость эффективности измельчения от отношения V_1 к V_2 при различных значениях технологического зазора между барабаном и валом-измельчителем S

Было установлено, что наиболее эффективным будет процесс измельчения при технологическом зазоре S между валом-измельчителем и перфорированным барабаном 10 мм. При технологическом зазоре 3 мм повышается выход готового продукта (растет Q_G), но при этом значительно увеличиваются затраты энергии на измельчение. При технологическом зазоре 16 мм снижается выход готового продукта (уменьшается Q_G), но при этом сокращаются и затраты энергии на измельчение.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенная теоретическая модель разрушения слабых горных пород, обладающих пластическими свойствами, основанная на энергетическом методе расчета контактных давлений, позволяет осуществлять теоретический анализ процесса измельчения, что обеспечивает при проектировании измельчительного оборудования выявление наиболее эффективных параметров рабочих поверхностей агрегатов, а также оптимальных режимов переработки.

Представленный подход, основанный на теоретическом анализе принятой модели, позволит на этапе проектирования нового агрегата выявить ведущие закономерности технологического процесса переработки, что обеспечит получение наиболее эффективных решений. Анализ результатов, полученных на основе теоретических исследований, выявил, что при соотношении касательных скоростей вала-измельчителя и перфорированного барабана $V_1 = 3V_2$, давление на рабочие поверхности измельчителя-классификатора может снижаться до 1,5 раза. Это позволит существенно снизить энергозатраты на измельчения.

Экспериментальные испытания на лабораторной установке показали, что для достижения наивысшей эффективности процесса измельчения слабых горных пород, обладающих пластическими свойствами, необходимо проводить дополнительные исследования в зоне оптимальных параметров разрушения для уточнения технологических режимов переработки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алваниян А.К., Алваниян К.А. Физико-механические свойства гипсового камня и инженерно-геологические условия Селищенского месторождения строительного гипса // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология*. 2019. Т. 18. № 4. С. 386–393.
2. Авдохин В.М. Обогащение углей: учебник для вузов: в 2 т. Процессы и машины. М.: Горная книга, 2012. Т. 1. 424 с.
3. Донченко А.С., Донченко В.А. Справочник механика рудообогатительной фабрики. М.: Недра, 1986. 543 с.
4. Хопунов Э.А. Формализация факторов управляемого разрушения в процессах рудоподготовки // *Современные научные исследования и инновации*. 2020. № 1. URL: <https://web.sciencedirect.com/science/article/pii/S1875382720300014> (дата обращения: 09.04.2025).
5. Бибиков П.Я., Бардовский А.Д., Митусов П.Е., Калакутский А.В. Разработка конструкции измельчителя-классификатора для переработки слабых горных пород // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2015. № 3. С. 233–237.
6. Романович А.А., Романович М.А., Чеховской Е.И. Расчет усилия, необходимого для создания направленного движения сланцевых материалов в пресс-валковом агрегате // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2018. № 8. С. 131–137.

7. Мажитов А.М., Корнеев С.А., Бондарь Е.А., Шаронова А.А. Оценка напряженно-деформированного состояния массива при отработке запасов в техногенно-осложненных условиях // Актуальные проблемы горного дела. 2017. № 2 (4). С. 19–26.

8. Маковкин Г.А., Лихачева С.Ю. Применение МКЭ к решению задач механики деформируемого твердого тела. Нижний Новгород: изд-во ННГАСУ, 2012. 73 с.

9. Горлов И.В., Митусов П.Е. Анализ процесса измельчения слабых горных пород // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2022. № 1 (13). С. 57–65.

10. Горлов И.В., Митусов П.Е. Моделирование процесса разрушения слабых горных пород, обладающих пластическими свойствами // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2023. № 4 (20). С. 26–36.

Для цитирования: Горлов И.В., Митусов П.Е. Анализ эффективности агрегата для комплексной переработки горных пород, обладающих пластическими свойствами // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2025. № 3 (27). С. 93–102.

ANALYSIS OF THE EFFICIENCY OF THE UNIT FOR THE COMPLEX PROCESSING OF ROCKS WITH PLASTIC PROPERTIES

I.V. GORLOV¹, Dr. Sc., P.E. MITUSOV², Cand. Sc.

¹Tver State Technical University,

22, Af. Nikitin emb., Tver, 170026, e-mail: gorloviv@yandex.ru

²Moscow Research and Development Institute of Technology and Innovation,
4, Nagatinsky 1st pr., Moscow, 117105

The article presents an analysis of typical units for classification and grinding of materials. A new type of complex unit is proposed, which can be used for processing weak materials with significant plastic properties. The proposed unit will allow both grinding and classification of the studied rocks within a single cycle, excluding additional transportation and intermediate storage of the processed product. An original design of a complex unit - a grinder-classifier is proposed, and its operating principle is described. Some elements of engineering calculations for determining the most important process parameters in the processing of rocks with significant plastic properties are also presented. The paper presents the results of the analysis of the growth of process efficiency when using a grinder-classifier for processing weak rocks with significant plastic properties.

Keywords: grinding, classification of rocks, energy method, shear stresses, grinder shaft, perforated drum, efficiency.

Поступила в редакцию/received: 05.05.2025; после рецензирования/revised: 07.05.2025;
принята/accepted: 12.05.2025

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ

УДК 004.896

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОСТРОЕНИЯ ТРАЕКТОРИИ ПОДВИЖНОГО ОБЪЕКТА НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ

М.И. БЕСХМЕЛЬНОВ, препод., Б.К. ЛЕБЕДЕВ, д-р техн. наук,
О.Б. ЛЕБЕДЕВ, д-р техн. наук

МИРЭА – Российский технологический университет,
119454, Москва, пр-т Вернадского, 78, e-mail: m_beskhemnov@mail.ru

© Бесхмельнов М.И., Лебедев Б.К., Лебедев О.Б., 2025

В статье представлен детальный анализ гибридного алгоритма планирования маршрута, предназначенного для навигации в двухмерном пространстве, с учетом частичной неопределенности в информации о местности. Алгоритм функционирует поэтапно и разделяется на два уровня. На первом уровне происходит формирование локальной зоны видимости объекта и определение покрываемого региона на карте. На втором уровне алгоритм отвечает за создание множества возможных траекторий прохождения объекта через каждый из идентифицированных на первом уровне регионов. Важной особенностью является использование муравьиного алгоритма, что позволяет эффективно исследовать пространство вариантов и находить оптимальные пути. После обработки алгоритм формирует общую траекторию, представляющую собой связную последовательность отдельных участков, каждый из которых является оптимальным путем.

Ключевые слова: траектория, алгоритм, ситуационное планирование, частичная неопределенность, локальная зона видимости, подвижный объект.

DOI: 10.46573/2658-5030-2025-3-103-119

ВВЕДЕНИЕ

Задача проектирования траекторий (трасс) имеет достаточно широкое применение [1, 2]. Это проектирование соединений интегральных схем, автомобильных дорог, коммуникационных сетей и др. К настоящему времени разработано достаточно большое количество алгоритмов для решения задач построения траекторий в различных постановках и с учетом различного рода ограничений [3]. Траектории формируются (прокладываются) на некоторой карте местности последовательно, часто в условиях неполной определенности, от начальной точки к целевой [5]. Цель настоящей работы заключается в разработке нового гибридного метода планирования траекторий. Процесс формирования траектории в условиях частичной неопределенности осуществляется последовательно (пошагово) на двух уровнях каждого шага. Процедурами первого уровня на карте местности последовательно по шагам формируется цепочка попарно смежных регионов с локализованными препятствиями. При слиянии цепочки регионов образуется область местности, через которую прокладывается траектория.

В результате проведенных исследований было установлено, что эффективность решения определяется, с одной стороны, возможностями технических средств (радаров, лидаров), позволяющих оценить текущую ситуацию, а с другой – методикой и методами построения траектории [3–5]. Разработана модернизированная методика пошагового проектирования траектории с использованием адаптивного опорного вектора, задающего предпочтительное направление перемещения подвижного объекта (ПО), и определены подходы к формированию, соотношению размеров, взаимному расположению и ориентации на местности локальной зоны видимости и регионов. Предложены новые методика и методы проектирования траектории с учетом упомянутых факторов [1–4].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Процессы синтеза (прокладки) траектории и передвижения по ней ПО связаны, причем передвижение по траектории происходит практически одновременно с ее формированием (прокладкой). Это связано с неопределенностью ограничений на карте местности, препятствующих прокладке траекторий [5, 6]. Наличие неопределенности обусловлено тем, что применительно к ПО такие препятствия не локализованы, так как система управления предварительно не имеет никакой информации ни об их форме, ни о размере, ни о параметрах их перемещения и расположения [3, 6, 7].

Процесс формирования маршрута и перемещения ПО на местности включает следующие этапы:

1. Формирование модели карты местности [1–3, 7].
2. Фиксация на модели карты местности исходной и целевой позиций траектории [8, 9].
3. Генерация в соответствии с техническими возможностями локатора ПО локальной зоны видимости (ЛЗВ) относительно опорного вектора и исходной позиции ПО [8, 9].
4. Анализ ЛЗВ и выявление (локализация) препятствий в ее пределах с помощью сенсорной подсистемы ПО [9, 10].
5. Формирование конфигурации региона, покрываемого ЛЗВ с препятствиями, выявленными радаром и лидаром в зоне видимости. Выбор границ входа и выхода из региона [1, 3, 9, 10].
6. Фиксация входной позиции на границе входа в регион. Входная позиция первого региона совмещается с исходной позицией ЛЗВ [8–10].
7. Формирование на модели региона набора маршрутов Q , связывающих входную позицию региона с границей выхода из региона [1, 3, 9, 10].
8. Выбор выходной позиции на границе выхода из региона и фиксация маршрута, связывающего входную и выходную позиции в регионе [9–11].
9. Перемещение ПО по выбранному маршруту из входной позиции региона в выходную [1, 9–12].

Процессы формирования участка траектории и перемещения по нему объекта чередуются на каждом шаге. На рецепторной модели карты местности фиксируются две позиции: p_u – исходная позиция, p_d – целевая позиция.

Позиции p_u и p_d связываются опорной линией L_o . Длина L_o является кратчайшим расстоянием s_o между позициями p_u и p_d . Опорная линия служит ориентиром при прокладке траектории.

Процесс формирования траектории в условиях частичной неопределенности осуществляется последовательно (пошагово) на двух уровнях каждого шага.

Процедурами первого уровня на карте местности последовательно по шагам формируется цепочка попарно смежных регионов с локализованными препятствиями.

При слиянии цепочки регионов образуется область местности, через которую прокладывается траектория.

На основе данных в соответствии с конфигурацией местности определяются граничные размеры региона r_t , покрываемого ЛЗВ. Граничные размеры региона лежат в пределах граничных размеров ЛЗВ, покрывающей регион r_t . Основное требование к региону заключается в наличии сквозного прохода через него [10, 11].

Граничные размеры региона r_t считаются валидными, если существует проход через регион r_t . Изменение (деформация) конфигурации контура региона осуществляется путем параллельного сдвига сторон региона.

Процедурами второго уровня на шаге t формируется множество $M(t)$ траекторий прохода ПО через регион r_t от входной позиции $p_{ex}(t)$ к границе выхода из региона r_t . Для каждой траектории $m_t \in M$ вычисляется оценка пригодности ξ_t . Выбирается m_t с лучшей оценкой ξ_t и определяется выходная позиция $p_{вых}(t)$, которая является концевой вершиной траектории m_t , расположенной на границе выхода из региона r_t .

На шаге $t + 1$ граница выхода из региона r_t совмещается с границей входа в регион r_{t+1} , при этом выходная позиция $p_{вых}(t)$ совмещается с входной позицией $p_{ex}(t + 1)$.

Подвижный объект в течение заданного интервала времени перемещается в пределах региона r_t с учетом прогнозируемых параметров размещения подвижных и неподвижных объектов по кратчайшему пути от входной позиции p_i к новой позиции p_{i+1} , которая после прохода размещается в конце региона.

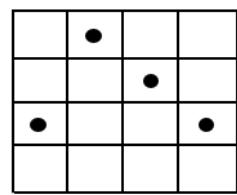
В работе описывается гибридный алгоритм планирования траектории в условиях частичной неопределенности для двухмерного пространства, основанный на интеграции волнового и муравьиного алгоритмов, позволяющий строить в реальном масштабе времени траектории минимальной длины с одновременной оптимизацией ряда других критериев качества построенного пути [10, 11].

Поиск решения осуществляется популяцией агентов на графе поиска решений $G = (E, U)$. Вершины множества E соответствуют ячейкам области R . Две вершины, $e_i \in E$ и $e_j \in E$, связаны ребром u_k , если соответствующие им ячейки на модели местности в виде дискретного рабочего поля (ДРП) смежны и возможен переход соединения из одной ячейки в другую.

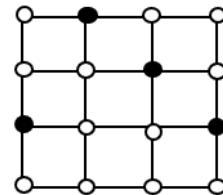
Наибольшее распространение для построения маршрута на плоскости получили волновые алгоритмы (метод распространения волнового фронта) [10, 11]. Карта местности при построении маршрута волновым алгоритмом разбивается на квадраты (ячейки), размер которых определяется на основе соотношения размеров подвижного объекта, препятствий, местности и требуемой точности.

На рис. 1(а) представлена модель региона местности в виде ДРП. Модель такого рода называют рецепторной. Дискретному рабочему полю региона соответствует граф (рис. 1(б)), вершины которого соответствуют ячейкам. Если две ячейки смежны, то соответствующие этим ячейкам вершины графа связаны ребром. С помощью радара ПО осуществляется локализация на модели региона препятствий и определяются параметры их перемещения [1, 3, 4, 11]. Ячейки ДРП отражают все возможные размещения ПО и препятствий в пространстве поиска.

На каждом шаге t относительно опорного вектора и входной позиции $p_{ex}(t)$ региона r_t , достигнутой на предыдущих шагах, формируется с помощью радара и лидара ПО ЛЗВ $z(t)$. Изначально все ячейки ДРП считаются свободными. В пределах ЛЗВ осуществляется определение координат (локализация) всех препятствий и параметров их перемещения [1, 10]. Ячейки с препятствиями помечаются.



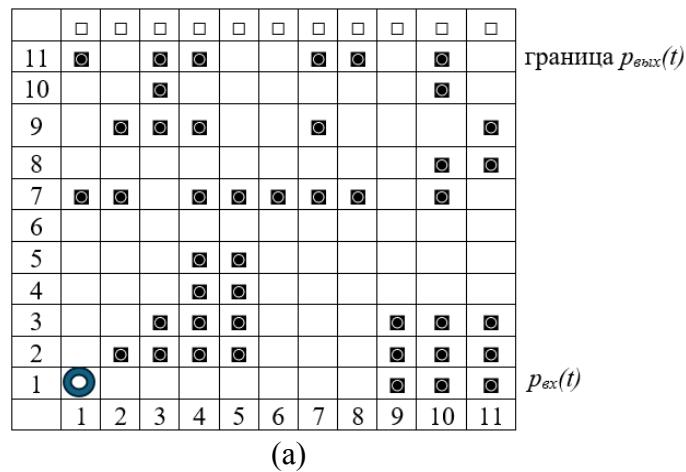
(a)



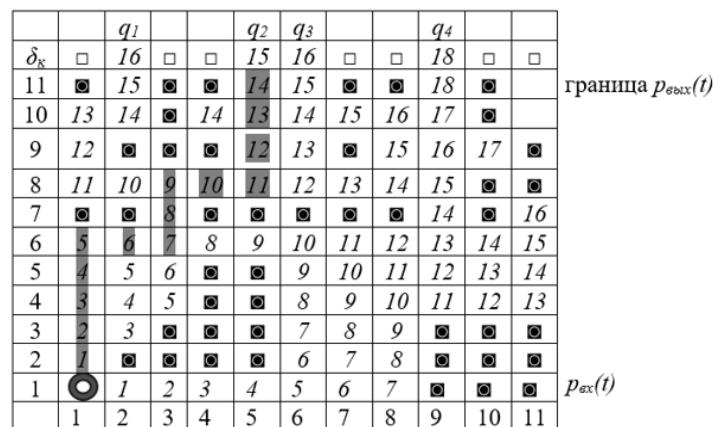
(б)

Рис. 1. Модель региона местности в виде дискретного рабочего поля (а) и граф, соответствующий ДРП региона (б)

На модели региона r_t в виде ДРП фиксируется входная $p_{ex}(t)$ позиция маршрута, проходящего через регион r_t . Фиксируется граница выхода из региона, на которой выбирается и размещается выходная позиция из региона $p_{exit}(t)$ (рис. 2(а)). На рис. 2(б) выбранный маршрут выделен цветом, а в качестве выходной позиции региона служит позиция q_2 .



(а)



(б)

Рис. 2. Модель региона r_t в виде ДРП: граница выхода из региона (а); выбранные маршрут и выходная позиция q_2 (б)

Процесс планирования траектории в регионе включает два этапа.

На первом этапе построения маршрута в регионе путем распространения на ДРП волны от источника (входная позиция $p_{ex}(t)$) к границе выхода из региона r_t

формируется пространство поиска R маршрута – $ППМ(t)$, представляющее совокупность связных ячеек ДРП, достигнутых волной, с присвоенными им весами.

В процессе распространения волны от источника к цели ячейкам ДРП присваиваются весовые оценки, связанные с принятым критерием оптимальности [10, 11].

После завершения распространения волны определяется множество достигнутых на ДРП волной ячеек $Q = \{q_k\}$, расположенных на границе выхода из региона r_t .

Если после распространения волны от источника в множество ячеек, достигнутых на ДРП волной, не вошли ячейки, расположенные на границе выхода из региона r_t , т.е. $Q = \emptyset$, то производится коррекция конфигурации региона путем изменения его размеров. Основные процедуры изменения конфигурации региона заключаются в последовательном наращивании слоя ячеек по периметру конфигурации модели региона. В рамках новой конфигурации региона производится дополнительное распространение волны на границу выхода [9]. Для каждой достигнутой волной вершины $q_k \in Q$ на границе выхода из региона в пространстве поиска на ДРП может существовать несколько вариантов маршрута, связывающего вершину q_k с вершиной $p_{ex}(t)$ [10–12].

На базе сформированного в регионе пространства поиска R муравьиным алгоритмом от каждой ячейки $q_k \in Q$ формируется маршрут $M_k(t)$, связывающий q_k с $p_{ex}(t)$. Построение каждого маршрута $M_k(t)$ выполняется популяцией P_k муравьев на графе поиска решений $G = (X, U)$. Вершины множества X соответствуют ячейкам области R . Две вершины, $x_i \in X$ и $x_j \in X$, связаны ребром, если соответствующие им ячейки на модели местности в виде ДРП смежны и возможен переход маршрута из одной ячейки в другую [10–12]. Каждая итерация l муравьиного алгоритма включает три этапа. На первом этапе каждый агент a_n популяции P_k конструктивным алгоритмом формирует на графе G маршрут $m_{kn}(t)$ из вершины q_k в вершину $p_{ex}(t)$.

Подобно волновому алгоритму, каждый муравей конструктивным алгоритмом строит на $ППТ(l)$ маршрут, представляющий совокупность ячеек ДРП с последовательно уменьшающимся весом. Всеми муравьями популяции P_k на базе каждой ячейки q_k будет построено множество M_k вариантов маршрута одной минимальной длины d_k , но с разными конфигурациями. Для оценки каждого маршрута m_{kn} используется параметр f_{kn} – число поворотов маршрута. Запоминаются лучшая оценка f_k и маршрут, полученные агентом a_n на l -й итерации.

На втором этапе итерации каждый агент a_n откладывает феромон на ребрах маршрута m_{kn} в количестве, пропорциональном оценке f_{kn} маршрута m_{kn} .

На третьем этапе итерации осуществляется общее испарение (уменьшение) количества феромона на всех ребрах графа поиска решений $G = (X, U)$ на некоторую величину и запоминается решение с лучшей оценкой [10–13]. Целью муравьиного алгоритма является поиск маршрута $m_k^* \in M_k$ с минимальным значением оценки f_{kn} . Для каждой ячейки $q_k \in Q$ определяется расстояние d_k от q_k до опорного вектора L_o . Для каждой траектории $M_k \in M$ вычисляется оценка пригодности ξ_k :

$$\xi_k = \alpha f_{ki} + \beta \delta_k + \gamma d_k.$$

В качестве маршрута, проложенного через регион r_t , выбирается маршрут m_k^* с лучшим значением оценки пригодности ξ_k , а в качестве выходной позиции региона r_t выбирается ячейка q_k , соответствующая вышеуказанным условиям.

Выбранный маршрут выделяется цветом, а в роли выходной позиции региона будет служить позиция q_2 .

После этого рассматривается второй регион, модель которого сформирована относительного выходной позиции первого региона. В пределах ЛЗВ определены координаты (локализация) всех препятствий и параметры их перемещения [10, 11–15]. Ячейки с препятствиями помечены.

На втором этапе прокладки траектории в регионе определяется выходная ячейка $p_{вых}(t) = q_k(t)$ и осуществляется выбор на ДРП региона маршрута, связывающего ячейки $p_{вх}(t)$ и $p_{вых}(t)$. Фиксируется весовые оценки δ_k множества Q ячеек ДРП.

В примере, представленном на рис. 2(б), $Q = \{q_1, q_2, q_3, q_4\}$; $\delta_1 = 16$, $\delta_2 = 15$, $\delta_3 = 16$, $\delta_4 = 18$.

В процессе распространения волны от источника к цели ячейкам ДРП присваиваются весовые оценки, связанные с принятым критерием оптимальности [10–12, 16, 17].

Муравьиным алгоритмом на базе сформированного пространства поиска R каждой ячейки $q_k \in Q$ формируется маршрут $m_k(t)$, связывающий q_k с $p_{вх}(t)$.

Процедурами второго уровня на шаге t формируется множество M траекторий прохода ПО через регион r_t , от входной позиции $p_{вх}(t)$ к границе выхода из региона r_t . Для каждой траектории $m_i \in M$ вычисляется оценка пригодности ξ_i . Выбирается m_i с лучшей оценкой ξ_i и определяется выходная позиция $p_{вых}(t)$, которая является концевой вершиной траектории q_i , расположенной на границе выхода из региона r_t .

На шаге $t + 1$ граница выхода из региона r_t совмещается с границей входа в регион r_{t+1} , при этом выходная позиция $p_{вых}(t)$ совмещается с входной позицией $p_{вх}(t + 1)$.

Подвижный объект в течение заданного интервала времени перемещается в пределах региона r_t с учетом прогнозируемых параметров размещения подвижных и неподвижных объектов по кратчайшему пути от входной позиции p_i к новой позиции p_{i+1} , которая после прохода размещается в конце региона.

На третьем этапе путем распространения на ДРП волны от источника – точки $ТП(t)$ к точке *цель* формируется пространство поиска траектории – *ППТ(l)*, представляющей совокупность связных ячеек ДРП, достигнутых волной, с присвоенными им весами [12].

На четвертом этапе муравьиным алгоритмом на сформированной области *ППТ(l)* прокладывается траектория $M(l)$ из точки *цель* к точке $ТП(l)$ [18–20].

Алгоритм формирования конфигурации маршрута:

1. Формирование рецепторной модели карты местности с заданным шагом дискретизации.

2. На рецепторной модели карты местности фиксируются две позиции: p_u – исходная позиция, p_u – целевая позиция.

3. Позиции p_u и p_u связываются опорным вектором L_o . Длина L_o является кратчайшим расстоянием s_o между позициями p_u и p_u .

4. $t = 1$ (t – номер шага).

5. На основе данных сенсорной системы ПО относительно позиции $p_{вх}(t)$ и опорного вектора генерируется контур ЛЗВ $z(p_{вх}(t))$, размеры и форма которого определяются техническими возможностями сенсорной системы ПО.

6. В пределах ЛЗВ с помощью радара и лидара ПО осуществляется обнаружение и определение координат (локализация) всех препятствий.

Задача обнаружения объекта заключается в нахождении в двухмерном случае областей ЛЗВ, покрываемых препятствиями, а также в нанесении меток на все дискреты ДРП, покрываемые препятствиями. Для обнаружения объектов по

моноизображениям наиболее точными являются методы, основанные на применении сверточных нейронных сетей.

7. В границах ЛЗВ $z(t)$ формируются конфигурация, ориентация и размеры региона r_t . На размеры региона накладываются ограничения. Регион r_t должен полностью покрываться ЛЗВ $z(t)$.

8. Фиксируется расположение региона r_t на карте местности.

9. Фиксируется граница региона, на которой размещается входная позиция $p_{ex}(t)$ в регион r_t , и граница региона, на которой размещается выходная позиция из региона $p_{vых}(t)$.

10. Формируются входная позиция региона r_t . Если $t = 1$ (t – номер шага), то $p_{ex}(t) = p_u$. Если $t > 1$, то в качестве входной позиции в регион r_t служит позиция $p_{ex}(t) = p_{vых}(t-1)$.

11. Подвижный объект помещается во входную позицию $p_{ex}(t)$ региона r_t . Затем экстраполируются параметры перемещения подвижных объектов.

12. Выполняется первый этап прокладки траектории в регионе r_t от позиции $p_{ex}(t)$ до границы выхода из региона r_t . Путем распространения на ДРП волны от источника (точка $p_{ex}(t)$) к границе выхода из региона r_t формируется пространство поиска траектории, представляющее собой совокупность достигнутых волной связных ячеек ДРП с присвоенными им весами.

13. Если волна не достигла границы выхода из региона r_t , то переход к п. 14, иначе переход к п. 15.

14. Производится изменение контура и размеров региона, без изменения $p_{ex}(t)$, и выполняется дополнительное распространение волны в обновленных границах региона. Переход к п. 13.

15. Определяется множество достигнутых волной ячеек $Q = \{q_k\}$, расположенных на границе выхода из региона r_t . Если в состав региона входит целевая позиция p_u , то $Q = \{p_u\}$. Фиксируются весовые оценки δ_i множества ячеек Q .

16. Построение муравьиным алгоритмом для каждой ячейки q_k маршрута $M_k(t)$ от q_k до $p_{ex}(t)$. Расчет оценок ξ_k пригодности всех маршрутов.

17. Выбор маршрута $M_k^*(t)$ от q_k^* до $p_{ex}(t)$ с лучшей оценкой ξ_k . Фиксация $p_{vых}(t) = q_k^*$, где q_k^* принадлежит лучшему маршруту. Маршрут $M_k^*(t)$ включается в множество маршрутов P , построенных в регионах.

18. Подвижный объект перемещается в позицию $p_{vых}(t)$.

19. Если маршрут $M_k^*(t)$ не достиг p_u , то формируется опорный вектор L_t , связывающий $p_{vых}(t)$ с p_u , $t = (t+1)$, и переход к п. 6, иначе переход к п. 20.

20. На базе построенных маршрутов в отдельных регионах формируется траектория маршрута из позиции p_u в позицию p_u .

21. Конец работы алгоритма.

Процесс формирования и ориентации ЛЗВ и покрываемого ею региона на карте местности выполняется относительно текущего опорного вектора (рис. 3).

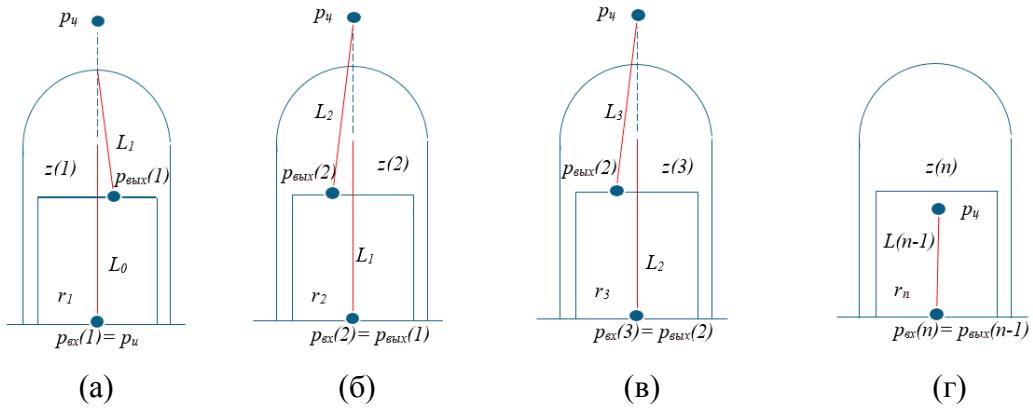


Рис. 3. Процесс формирования и ориентации ЛЗВ

и покрываемого ею региона на карте местности: взаимное расположение опорного вектора L_o , базовой линии, сформированной области ЛЗВ $z(1)$ и региона r_1 (а); формирование текущего опорного вектора L_1 , связывающего позиции $p_{вых}(1)$ и p_u (б); формирование текущего опорного вектора L_2 , связывающего позиции $p_{вых}(2)$ и p_u (в); последний регион (г)

На первом шаге в качестве текущей опорной линии служит линия L_o , связывающая позиции p_u и p_u . Через позицию p_u перпендикулярно к опорному вектору L_o проводится базовая линия, которая служит основанием для формируемой ЛЗВ и региона. Позиция p_u рассматривается в качестве входной позиции региона r_1 . На рис. 3(а) приведено взаимное расположение опорного вектора L_o , базовой линии, сформированных области ЛЗВ $z(1)$ и региона r_1 . После построения в регионе r_1 маршрута с лучшим значением оценки пригодности и выбора выходной позиции $p_{вых}(1)$ региона r_1 формируется текущий опорный вектор L_1 (см. рис. 3(б)), связывающий позиции $p_{вых}(1)$ и p_u . На втором шаге позиция $p_{вых}(1)$ служит в качестве входной позиции $p_{вых}(2) = p_{вых}(1)$ региона r_2 . Затем относительно опорного вектора L_1 через $p_{вых}(2)$ проводится базовая линия, на которой формируются и располагаются область ЛЗВ $z(2)$ и регион r_2 . После построения в регионе r_2 маршрута и выборе выходной позиции $p_{вых}(2)$ региона r_2 формируется текущий опорный вектор L_2 (см. рис. 3(в)), связывающий позиции $p_{вых}(2)$ и p_u . Если на некотором шаге n окажется, что позиция цели p_u расположена внутри региона r_n , то регион r_n будет последним (см. рис. 3(г)).

Отметим, что если при прокладке маршрута через регион волна, распространяясь от входной позиции в регион, не достигает выходной границы региона, то размеры региона увеличиваются до тех пор, пока не будет достигнута выходная граница региона. На размеры региона накладываются ограничения. В составе региона не допускается наличие областей, не покрываемых ЛЗВ, так как в данных областях могут быть неучтенные препятствия. В этом случае в качестве выходной позиции региона выбирается ближайшая к позиции p_u позиция, расположенная на одной из границ покрываемого ЛЗВ региона.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В ходе проведенных экспериментальных исследований преследовались две взаимосвязанные, но самостоятельные цели. Первая цель заключалась в углубленном изучении механизмов поиска траектории движения ПО с использованием роевых алгоритмов. Роевые алгоритмы, в основу которых положен принцип коллективного поведения социальных насекомых, таких как пчелы или муравьи, представляют собой мощный инструмент для решения задач оптимизации, в том числе и поиска

оптимального пути. Однако их эффективность напрямую зависит от правильного выбора параметров и архитектуры алгоритма. Именно поэтому в рамках данного исследования был разработан гибридный алгоритм, сочетающий преимущества волновых и роевых методов. Волновые алгоритмы, в отличие от роевых, основаны на том, что «волны» распространяются от точки старта к точке финиша, постепенно покрывая все пространство поиска. Такой подход позволяет эффективно находить пути в сложных ландшафтах, но может быть вычислительно затратным. Гибридный подход, используемый в данном исследовании, призван объединить сильные стороны обоих методов, обеспечивая как эффективность поиска, так и приемлемое время вычислений. В разработанном алгоритме волновой метод используется для грубого определения потенциальных путей, после чего роевой алгоритм уточняет эти пути, избегая препятствий и оптимизируя общую длину траектории.

Ключевыми параметрами, определяющими эффективность предложенного гибридного алгоритма, являются длина полученной траектории, время, затраченное на ее вычисление, и, что крайне важно, безопасность движения вдоль этой траектории. Под безопасностью мы понимаем минимальное расстояние от траектории до препятствий. Оптимизация этих трех параметров – непростая задача, требующая тщательного подбора весовых коэффициентов в алгоритме. Цель исследования заключалась в определении такого оптимального соотношения параметров, при котором компромисс между длиной траектории, временем вычислений и безопасностью движения обеспечивает наилучшее решение задачи построения траектории подвижного объекта. Необходимо найти «золотую середину», позволяющую сформировать достаточно короткий и безопасный путь в приемлемые сроки.

Вторая цель состояла в оценке качества разработанного гибридного алгоритма. Разработанный для этого интегральный критерий, учитывающий все три упомянутых выше параметра – длину траектории, время вычислений и безопасность, позволил объективно сравнить эффективность созданного алгоритма с уже известными методами построения траектории. Сравнение проводилось на основе тестовых примеров, обозначенных как Ex1, Ex2, Ex3, Ex4 и Ex5. Каждый пример представлял собой отдельную сцену, содержащую различные препятствия, расположенные на поле размером 20 x 20 дискретов (подобластей). На рис. 4 приведены пояснения условных обозначений, которые применялись при проведении тестовых экспериментов.

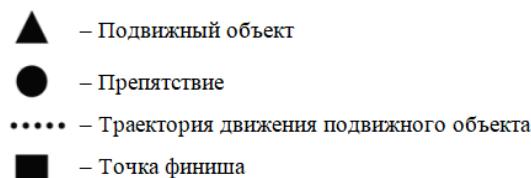


Рис. 4. Пояснения изображений используемых в тестовых примерах

Построение траектории заключается в выполнении следующих этапов (рис. 5):

1. Генерация зоны видимости.
2. Проведение анализа зоны видимости (обнаружение препятствий).
3. Исправление сетки графа в соответствии с обнаруженными препятствиями.
4. Нахождение кратчайшего пути по сетке графа.
5. Коррекция маршрута. Ближайшие к текущей позиции объекта узлы графа используются в качестве ориентира, позволяя объекту эффективно огибать препятствия. Это динамическое обновление траектории осуществляется каждый раз, когда объект попадает в новую область видимости, которая определяется через

заданный временной интервал или при обнаружении новых препятствий. Такой подход позволяет алгоритму адаптироваться к изменяющимся условиям окружающей среды и обеспечивает более гибкое и эффективное построение траектории, особенно в динамических средах, где препятствия могут менять свое положение.

Таким образом, исследование охватило как разработку нового гибридного алгоритма, так и его всестороннюю оценку с использованием четко определенных критериев и тестовых примеров. Полученные результаты позволили выявить преимущества и недостатки предложенного подхода по сравнению с существующими методами, открыли новые возможности для дальнейших исследований в области планирования траекторий движения.

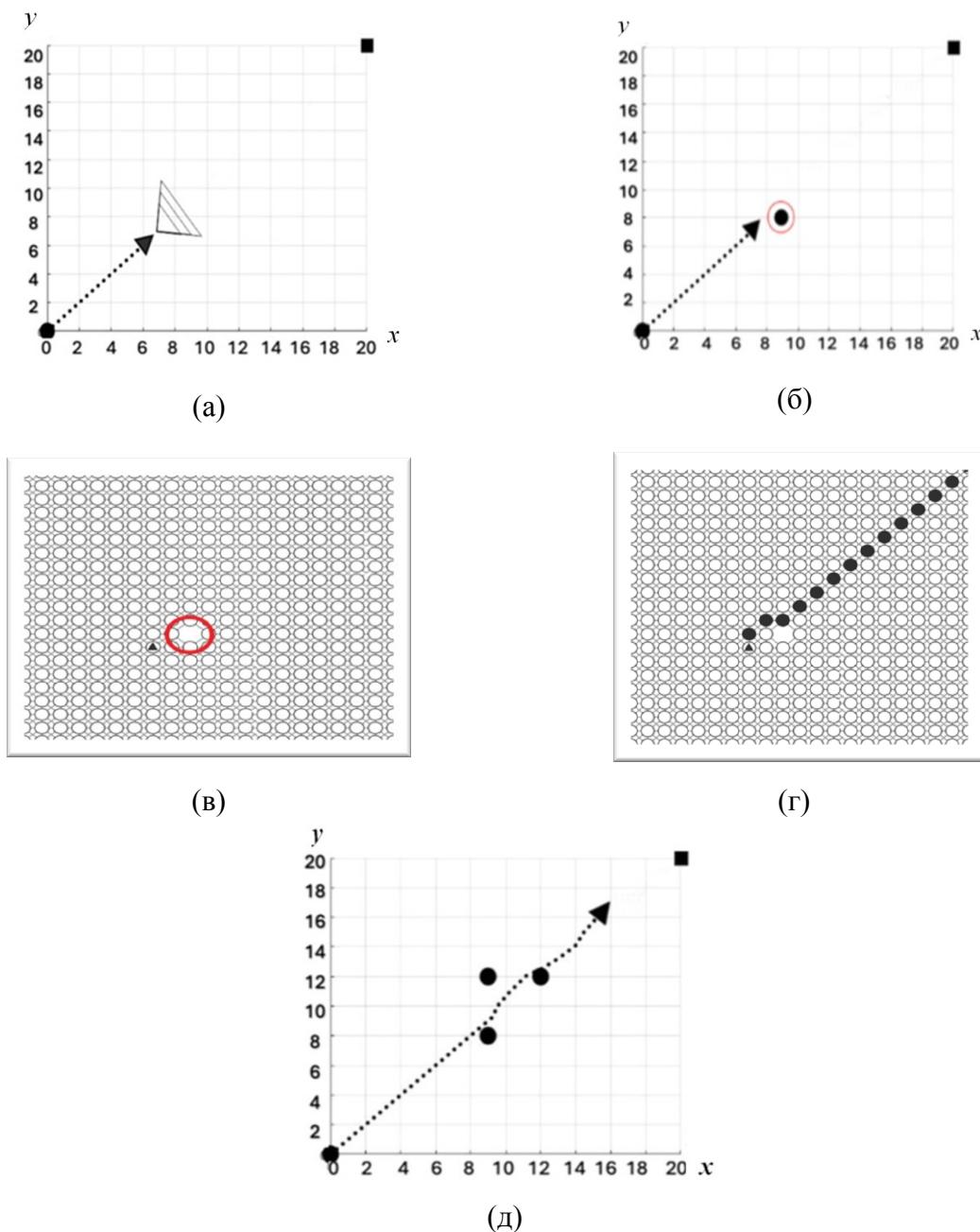


Рис. 5. Этапы построения траектории: генерация зоны видимости (а); обнаружение препятствий (б); исправление сетки графа (в); определение кратчайшего маршрута (г); коррекция маршрута (д)

В основе моделирования построения траектории для ПО лежит много-критериальная оптимизация, учитывающая несколько важных параметров. Ключевыми факторами, влияющими на качество траектории, являются показатель безопасности, длина траектории, время выполнения задания и коэффициент успешности миссии. Каждый из этих параметров имеет свой весовой коэффициент, отражающий его значимость в общей оценке.

Показатель безопасности (весовой коэффициент 20 %) определяется минимальным расстоянием между ПО и любым препятствием на протяжении всей траектории. Параметр критически важен, так как напрямую связан с риском столкновения. Чем больше это расстояние, тем безопаснее траектория. Минимизация риска столкновения является первостепенной задачей, особенно в условиях неопределенности и наличия непредвиденных препятствий. Низкое значение показателя безопасности свидетельствует о высокой вероятности аварийной ситуации, что недопустимо в большинстве приложений. В процессе оптимизации алгоритм стремится максимизировать данный показатель, обеспечивая необходимое расстояние между ПО и препятствиями. Это расстояние должно быть достаточно большим, чтобы учесть погрешности в работе датчиков, неточности в построении карты местности и возможные отклонения от заданной траектории.

Длина траектории (весовой коэффициент 20 %) – это общее расстояние, пройденное ПО от начальной точки до цели. Минимизация длины траектории способствует экономии энергии, времени и ресурсов. Однако стремление к кратчайшему пути может привести к снижению показателя безопасности, если кратчайший путь слишком близок к препятствиям. Поэтому оптимизация длины траектории должна осуществляться с учетом ограничения на минимальное расстояние до препятствий. Алгоритм должен находить баланс между кратчайшим путем и безопасностью движения.

Время выполнения задания (весовой коэффициент 20 %) – время, затраченное ПО на прохождение всей траектории. Этот параметр также важен, особенно в тех приложениях, где скорость выполнения является критическим фактором. Однако, как и в случае с длиной траектории, стремление к минимизации времени выполнения задания может повлечь за собой снижение показателя безопасности. Поэтому при оптимизации данного параметра следует учитывать ограничения на минимальное расстояние до препятствий и другие факторы, влияющие на скорость движения ПО (например, тип местности, характеристики ПО и наличие дополнительных задач).

Коэффициент успешности миссии (весовой коэффициент 40 %) – это, пожалуй, самый важный параметр, учитывающий вероятность успешного завершения движения в условиях неопределенности и наличия сложных препятствий. Он отражает надежность и способность алгоритма построения траектории адаптироваться к меняющимся условиям. Высокий коэффициент успешности миссии указывает на то, что алгоритм в состоянии успешно преодолевать препятствия и достигать цели даже в сложных и непредсказуемых ситуациях. Этот параметр учитывает вероятностные аспекты движения, и его оптимизация часто требует применения методов стохастической оптимизации. Рассмотрим процесс моделирования построения траектории на тестовых примерах.

Пример 1 демонстрирует ситуацию, когда отсутствует параметр, ограничивающий минимальное расстояние до препятствий. В результате ПО строит траекторию, проходящую опасно близко к препятствиям, что приводит к низкому показателю безопасности. Здесь подчеркивается важность явного задания ограничения на минимальное расстояние до препятствий для обеспечения безопасности движения.

Данные из этого примера (рис. 6, табл. 1) наглядно показывают критичность игнорирования параметра безопасности.

Пример 2. Препятствия представлены в виде окружностей (рис. 7), и ПО корректирует свою траекторию, избегая попадания в центр любой из них. Это демонстрирует адаптивность алгоритма к изменению условий окружающей среды и способность к локальной оптимизации траектории. Результаты, представленные в табл. 2, показывают, что эффективность алгоритма зависит от точности представления препятствий. **В реальных условиях точность модели препятствий может быть ограничена**, что необходимо учитывать при разработке алгоритма.

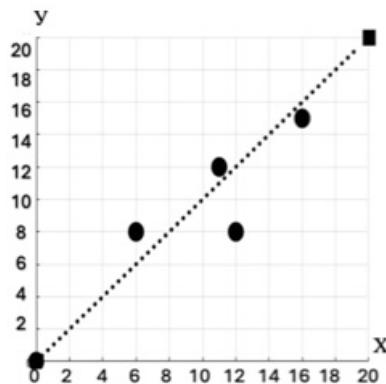


Рис. 6. Пример 1

Таблица 1. Анализ параметров по примеру 1

Показатель	Данные из источника (a)	Полученные данные (b)	Разница (a - b)
Безопасность, м	0,33	0,25	0,8
Траектория, м	29,42	27	2,42
Время, с	34,20	54	20,20
Успех миссии	1	1	-

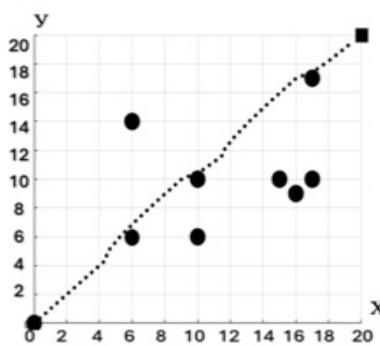


Рис. 7. Пример 2

Таблица 2. Анализ параметров по примеру 2

Показатель	Данные из источника (a)	Полученные данные (b)	Разница (a - b)
Безопасность, м	0,35	0,19	0,16
Траектория, м	29,47	27,5	1,97
Время, с	34,38	55	20,62
Успех миссии	1	1	-

Пример 3 иллюстрирует многошаговую корректировку траектории в ответ на обнаружение нескольких препятствий (рис. 8). Подвижный объект, обнаружив препятствие 1, корректирует траекторию, смещаясь влево. Однако после обнаружения препятствия 2 алгоритм пересчитывает траекторию с учетом нового положения ПО и препятствий, что приводит к смещению вправо. Этот сценарий показывает важность динамического перепланирования траектории в ответ на изменения окружающей среды. Данный пример показывает необходимость алгоритма, способного к перепланированию в реальном времени и адаптации к динамически меняющейся обстановке. Отсутствие такой адаптации может привести к «застреванию» ПО или столкновению с препятствиями. Анализ данных из примера 3 позволяет оценить эффективность алгоритма перепланирования траектории (табл. 3).

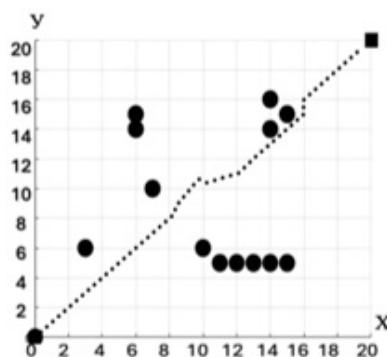


Таблица 3. Анализ параметров по примеру 3

Показатель	Данные из источника (a)	Полученные данные (b)	Разница (a - b)
Безопасность, м	1,06	0,25	0,81
Траектория, м	29,35	28	1,35
Время, с	34,38	56	21,62
Успех миссии	1	1	—

Рис. 8. Пример 3

Пример 4. Как и в примерах 1 и 2, маршрут пересекает препятствие из-за отсутствия параметра, определяющего допустимое приближение ПО к препятствию (рис. 9). Полученные данные примера 4 сведены в табл. 4.

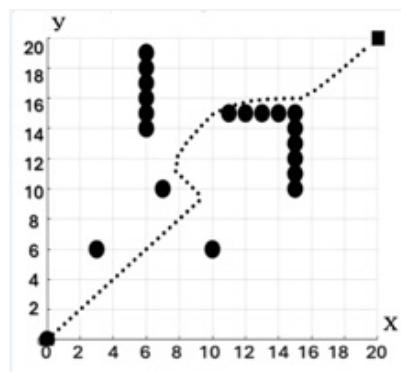


Таблица 4. Анализ параметров по примеру 4

Показатель	Данные из источника (a)	Полученные данные (b)	Разница (a - b)
Безопасность, м	0,04	0,18	0,14
Траектория, м	34,17	30,5	3,67
Время, с	52,62	61	8,38
Успех миссии	1	1	—

Рис. 9. Пример 4

Пример 5. Так же, как и в примерах 1, 2 и 4, траектория пересекает препятствие из-за отсутствия параметра, определяющего допустимое приближение ПО к препятствию (рис. 10). Данные примера 5 сведены в табл. 5.

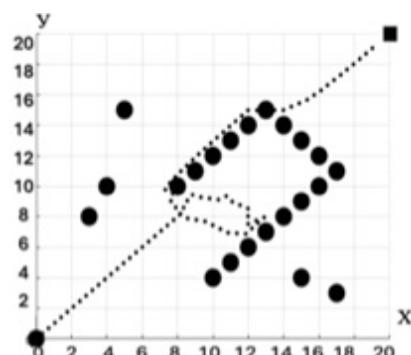


Таблица 5. Анализ параметров по примеру 5

Показатель	Данные из источника (a)	Полученные данные (b)	Разница (a - b)
Безопасность, м	1,06	0,01	1,05
Траектория, м	42,68	41,5	1,18
Время, с	75,42	83	7,58
Успех миссии	1	1	—

Рис. 10. Пример 5

В табл. 6 приведены усредненные значения используемых в работе параметров, в табл. 7 представлены нормированные значения параметров и их интегральная оценка.

Таблица 6. Усредненные значения параметров

Методы	Показатели			
	S_m	P_L	t_m	F
Метод потенциальных полей 1	0,104	0,019 75	0,015 93	0,6
Метод потенциальных полей 2	0,028	0,006 65	0,005 32	0,2
Метод потенциальных полей 3	0,37	0,032 05	0,025 93	1,0
Метод потенциальных полей 4	0,724	0,025 95	0,020 97	0,8
Метод потенциальных полей 5	0,344	0,02	0,163 3	0,6
Метод потенциальных полей 6	0,576	0,025 91	0,021 32	0,8
Метод диаграмм Вороного	0,44	0,020 52	0,017 28	0,6
Метод реактивной навигации	0,656	0,024 12	0,024 73	0,8
Метод управления с применением нечетких систем	0,495	0,025 07	0,012 53	1,0
DVH-метод в классическом базисе	0,068	0,031 3	0,070 08	1,0
DVH-метод в базисе формальных нейронов	0,068	0,031 3	0,070 08	1,0
Нейросетевой гибридный метод	0,076	0,031 7	0,037 95	1,0
Генетический поиск без картографии	0,074	0,013 53	0,011 03	0,4
Генетический поиск с картографией	0,565	0,030 94	0,023 73	1,0
Метод планирования с использованием неустойчивых режимов	0,317	0,020 32	0,019 64	0,8
Комбинированный метод планирования с использованием неустойчивых режимов и виртуальной целевой точки	0,838	0,025 76	0,016 75	1,0
Муравьиный метод	0,176	0,032 4	0,016 2	1,0

Таблица 7. Нормированные значения параметров и их интегральная оценка

Метод	Показатели				
	S_m	P_L	t_m	F	I
DVH-метод в классическом базисе	0,081 1	0,967 2	1,0	1,0	0,809 7
DVH-метод в базисе формальных нейронов	0,081 1	0,967 2	1,0	1,0	0,809 7
Комбинированный метод планирования с использованием неустойчивых режимов и виртуальной целевой точки	1,0	0,796 0	0,239 1	1,0	0,807
Генетический поиск с картографией	0,674 2	0,956 0	0,338 6	1,0	0,793 8
Метод потенциальных полей 3	0,441 5	0,990 3	0,370 0	1,0	0,760 4
Нейросетевой гибридный метод	0,907	0,979 5	0,541 5	1,0	0,722 3
Метод потенциальных полей 4	0,864	0,801 9	0,299 2	0,8	0,713
Метод управления с применением нечетких систем	0,590 4	0,774 7	0,178 8	1,0	0,708 8
Метод реактивной навигации	0,782 8	0,745 3	0,352 8	0,8	0,696 2
Муравьиный метод	0,210 0	1,0	0,230 9	1,0	0,668 2
Метод потенциальных полей 6	0,687 4	0,618 0	0,304 3	0,8	0,641 9
Метод планирования с использованием неустойчивых режимов	0,378 3	0,627 9	0,280 4	0,8	0,577 3
Метод диаграмм Вороного	0,525 1	0,634 1	0,246 5	0,6	0,521 1
Метод потенциальных полей 5	0,410 5	0,801 9	0,233 0	0,6	0,529 1
Метод потенциальных полей 1	0,124 1	0,610 3	0,227 3	0,6	0,432 3

Метод	Показатели				
	S_m	S_m	S_m	S_m	S_m
Генетический поиск без картографии	0,087 7	0,418 1	0,157 3	0,4	0,292 6
Метод потенциальных полей 2	0,033 4	0,205 5	0,075 9	0,2	0,143

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Несмотря на достаточно большое количество разработанных моделей и алгоритмов управления ПО в условиях неопределенности, исследователи сталкиваются с рядом проблем, к числу которых относится трудность в обосновании качества результатов анализа с учетом специфики конкретной задачи. Одним из перспективных направлений является разработка гибридных методов. В гибридных (комбинированных) алгоритмах, объединяющих различные либо одинаковые алгоритмы, но с различными значениями свободных параметров, преимущества одного алгоритма могут компенсировать недостатки другого. Предложенный в статье гибридный алгоритм позволяет строить в реальном масштабе времени траектории минимальной длины с синхронной оптимизацией ряда других критериев качества построенного пути. Отличительная особенность данного алгоритма заключается в том, что перемещение ПО по траектории происходит практически одновременно с ее формированием (прокладкой) в текущем режиме времени. Моделирование построения траектории для ПО – сложная задача, требующая учета множества факторов и применения методов многокритериальной оптимизации. Успех ее решения зависит от правильного выбора весовых коэффициентов для каждого параметра и от разработки алгоритма, способного к адаптации к изменяющимся условиям и обеспечению высокой степени безопасности движения. Анализ результатов тестовых примеров позволяет оценить эффективность разработанного алгоритма и выявить области для дальнейшего улучшения.

Предложенная модернизированная методика пошагового проектирования траектории позволила повысить эффективность решения, что подтверждено результатами экспериментальных исследований. Было установлено, что значительное влияние на улучшение характеристик оказали использование адаптивного опорного вектора, задающего предпочтительное направление перемещения ПО, модернизированная методика пошагового проектирования траектории и подходы к формированию размеров, соотношению взаимного расположения и ориентации на местности локальной зоны видимости и регионов. Практическое применение описанной методики и методов проектирования траектории с учетом упомянутых факторов позволяют упростить конфигурацию траектории и минимизировать ее общую длину, в результате чего уменьшаются вычислительные затраты и время прохождения по маршруту. Источником усовершенствования может быть более детальная проработка вопросов, связанных с формированием ЛЗВ и выбором (сменой) текущих исходных позиций, что ускорит процесс достижения ПО целевого состояния.

ЛИТЕРАТУРА

1. Белоглазов Д.А., Гузик В.Ф., Косенко Е.Ю. [и др]. Интеллектуальное планирование траекторий подвижных объектов в средах с препятствиями / под ред. В.Х. Пшихопова. М.: Физматлит, 2014. 300 с.
2. Гузик В.Ф., Переверзев В.А., Пьявченко А.О., Сапрыкин Р.В. Принципы построения экстраполирующего многомерного нейросетевого планировщика интел-

лектуальной системы позиционно-траекторного управления подвижными объектами // *Известия ЮФУ. Технические науки*. 2016. № 2 (175). С. 67–80.

3. Пшихопов В.Х., Медведев М.Ю., Гуренко Б.В. Алгоритмы адаптивных позиционно-траекторных систем управления подвижными объектами // *Проблемы управления*. 2015. № 4. С. 66–74.

4. Нейдорф Р.А., Полях В.В., Черногоров И.В., Ярахмедов О.Т. Исследование эвристических алгоритмов в задачах прокладки и оптимизация маршрутов в среде с препятствиями // *Известия ЮФУ. Технические науки*. 2016. № 3 (176). С. 127–143.

5. Веселов Г.Е., Лебедев Б.К., Лебедев О.Б. Биоинспирированный алгоритм планирования траектории в условиях частичной неопределенности и наличии перемещающихся препятствий // *Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте: Сборник научных трудов XI Международной научно-технической конференции*. Переславль-Залесский: Российская ассоциация искусственного интеллекта, 2022. Т. 1. С. 298–309.

6. Каляев И.А., Гайдук А.Р., Капустян С.Г. Методы и модели коллективного управления в группах роботов. М.: Физматлит, 2009. 280 с.

7. Котов Д.В., Лебедев О.Б. Управление передвижением группы БПЛА с соблюдением геометрической структуры строя на основе альтернативной коллективной адаптации // *Известия ЮФУ. Технические науки*. 2024. № 1. С. 155–167.

8. Пшихопов В.Х., Медведев М.Ю. Управление подвижными объектами в определенных и неопределенных средах. М.: Наука, 2011. 349 с.

9. Лебедев Б.К., Лебедев О.Б. Гибридный алгоритм ситуационного планирования траектории на плоскости в условиях частичной неопределенности // *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*. 2018. № 1. С. 76–93.

10. Лебедев Б.К., Лебедев О.Б. Планирование двухмерной траектории в условиях частичной неопределенности на основе интеграции волнового и муравьиного алгоритмов // *Гибридные и синергетические интеллектуальные системы: Сборник трудов V Всероссийской Постоловской конференции с международным участием* / под ред. А.В. Колесникова. Зеленоградск: БФУ им. И. Канта, 2020. С. 87–94.

11. Карпенко А.П. Современные алгоритмы поисковой оптимизации. Алгоритмы, вдохновленные природой: учебное пособие. Изд. 3-е, испр. М: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2021. 448 с.

12. Бекетов С.М., Зубкова Д.А., Гинцяк А.М., Бурлуцкая Ж.В., Редько С.Г. Современные методы оптимизации и особенности их применения // *Russian Technological Journal*. 2025. Т. 13. № 4. С. 78–94.

13. Chen S., Eshaghian M. M. A fast recursive mapping algorithm // *Concurrency: Practice and Experience*. 1995. V. 7. № 5. С. 391–409.

14. Lebedev O.B., Beskhmelnov M.I. Dynamic Formation of Robot Movement Route in Nondeterministic Environment with Bypassing Stationary and Nonstationary Obstacles // *Pattern Recognition and Image Analysis*. 2024. V. 34. № 3. P. 543–548.

15. Лебедев Б.К., Лебедев О.Б., Бесхмельнов М.И. Децентрализованное управление группой автономных подвижных объектов при формировании траектории движения // *Известия ЮФУ. Технические науки*. 2024. № 6 (242). С. 177–190.

16. Кузнецов А.В. Модель движения и взаимодействия системы интеллектуальных агентов // *Вестник ВГУ. Серия: Системный анализ и информационные технологии*. 2018. № 2. С. 130–138.

17. Байгутлина И.А. Реализация новых сервисов с использованием робототехнических комплексов // *Славянский форум*. 2021. № 4 (34). С. 162–170.

18. Морозова Н.С. Децентрализованное управление движением строя роботов при динамически изменяющихся условиях // *Искусственный интеллект и принятие решений*. 2015. № 1. С. 65–74.
19. Веселов Г.Е., Лебедев Б.К., Лебедев О.Б. Управление движением группы мобильных роботов в колонне // *Информатизация и связь*. 2021. № 3. С. 7–11.
20. Карпов В.Э. Коллективное поведение роботов. Желаемое и действительное // *Современная мехатроника: Сборник научных трудов Всероссийской научной школы*. 2011. С. 35–51.
21. Успанова Р.А. Актуальные проблемы управления группой БПЛА // *Молодежь. Техника. Космос: Труды тринацатой общероссийской молодежной научно-технической конференции: в 2 т. Сер.: Библиотека журнала «Военмех. Вестник БГТУ»*. СПб.: Военмех, 2021. Т. 1. № 76. С. 128–130.

Для цитирования: Бесхмельнов М.И., Лебедев Б.К., Лебедев О.Б. Моделирование построения траектории подвижного объекта на основе методов многокритериальной оптимизации // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2025. № 3 (27). С. 103–119.

MODELING THE CONSTRUCTION OF A MOBILE OBJECT'S TRAJECTORY BASED ON MULTICRITERIAL OPTIMIZATION METHODS

M.I. BESKHMELNOV, Lecturer, B.K. LEBEDEV, Dr. Sc.,
O.B. LEBEDEV, Dr. Sc.

MIREA – Russian Technological University,
78 Vernadsky Ave., Moscow, 119454, e-mail: beshmelnov@mirea.ru

This paper presents a detailed analysis of a hybrid route planning algorithm designed for navigation in two-dimensional space taking into account partial uncertainty in terrain information. This innovative approach combines the advantages of the wave algorithm and the ant colony algorithm, which allows for the efficient construction of the shortest trajectories in real time, while simultaneously optimizing other important route parameters, such as avoiding difficult sections or taking into account preferred terrain types. The algorithm operates in stages, alternating the processes of constructing a trajectory section and the actual movement of an object along it. Each planning stage is divided into two levels. At the first level, a local visibility zone of the object is formed and the region covered by it is determined on the map. Then, sequentially, step by step, the algorithm builds a chain of interconnected regions, each of which contains information about localized obstacles. The second level of the algorithm is responsible for creating a set of possible trajectories for the object to pass through each of the regions identified at the first level. An important feature is the use of the ant algorithm at this stage, which allows one to effectively explore the space of options and find optimal paths that minimize various criteria, including path length.

Keywords: trajectory, algorithm, situational planning, partial uncertainty, local visibility zone, moving object.

Поступила в редакцию/received: 21.04.2025; после рецензирования/revised: 24.04.2025;
принята/accepted: 30.04.2025

**ВЕСТНИК
ТВЕРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА**

Серия «Технические науки»

**Научный рецензируемый журнал
№ 3 (27), 2025**

Online ISSN 2687-0029

Редактор М.Б. Юдина
Корректор Е.Г. Подгорная

Дата выхода в свет 01.10.25

Редакционно-издательский центр
Тверского государственного технического университета
170026, Тверь, наб. Афанасия Никитина, 22