

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

ВЕСТНИК
ТВЕРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

Серия «Технические науки»

Научный рецензируемый журнал
№ 4 (24), 2024

Print ISSN 2658-5030
Online ISSN 2687-0029

Тверь 2024

Учредитель: ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет»

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

Заместители главного редактора:

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

Яблонев А.Л., д.т.н., 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

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

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

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»

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.физ.-мат. наук, 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 ТвГТУ

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: ПИ № ФС77-74321 от 19 ноября 2018 года. 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>Измайлов В.В., Новоселова М.В.</i> Изнашивание при фреттинге: режимы и основные факторы	5
<i>Болотов А.Н., Новиков В.В., Новикова О.О.</i> Обработка технической керамики абразивным алмазным инструментом	13
<i>Барчуков Д.А., Смолякова И.А., Афанасьева Л.Е.</i> Влияние технологических параметров лазерной резки на размер зоны лазерного воздействия.....	22

НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ И ГОРНЫЕ НАУКИ

<i>Яблонев А.Л.</i> Формы сечений кускового торфа и его прочность на изгиб	29
<i>Пухова О.В., Шахматов К.Л., Женихов К.Ю.</i> Пути улучшения технико-экономических характеристик производства кускового торфа	37
<i>Павлов Ю.Н., Кондратьев А.В., Кочканян С.М., Масленников Д.Г.</i> Перспективные разработки для дорожного строительства.....	45
<i>Мнацаканян В.У., Нгуен С.Х., Нго В.Н.</i> Повышение коррозионной стойкости металлоконструкций горных машин.....	51
<i>Шахматов К.Л., Пухова О.В., Женихов К.Ю.</i> Влияние вида фрезерующего агрегата на качественные показатели торфа для производства грунтов	58

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ

<i>Дзюба С.М., Емельянова И.И.</i> О рекуррентных и обобщенно-рекуррентных решениях неавтономных дифференциальных уравнений.....	68
<i>Бурдо Г.Б., Болотов А.Н.</i> Повышение эффективности инструментов бережливого производства и управления качеством	75
<i>Полетаева Е.В., Горлов И.В.</i> Родовидовые отношения как опорная структура автоматизированной информационной системы машиностроения.....	89
<i>Полетаева Е.В., Горлов И.В.</i> Реализация модульного принципа на базе онтологии предметной области машиностроения.....	96

CONTENTS

MECHANICAL ENGINEERING

<i>Izmailov V.V., Novoselova M.V.</i> Fretting wear: regimes and key factors.....	5
<i>Bolotov A.N., Novikov V.V., Novikova O.O.</i> Processing of technical ceramics with an abrasive diamond tool.....	13
<i>Barchukov D.A., Smolyakova I.A., Afanasieva L.E.</i> Influence of technological parameters of laser cutting on the size of the laser impact zone.....	22

SUBSOIL USE AND MINING SCIENCES

<i>Yablonev A.L.</i> Shape of sections of soud peat and its flexural strength.....	29
<i>Pukhova O.V., Shakhmatov K.L., Zhenikhov K.Yu.</i> Ways to improve the technical and economic characteristics of production of lump peat.....	37
<i>Pavlov Yu.N., Kondratyev A.V., Kochkanyan S.M., Maslennikov D.G.</i> Prospective developments for road construction.....	45
<i>Mnatsakanyan V.U., Nguyen X.H., Ngo V.N.</i> Improving the corrosion resistance of mining machines metal structures.....	51
<i>Shakhmatov K.L., Pukhova O.V., Zhenikhov K.Yu.</i> Influence of the type of milling unit on the quality indicators of peat for soil production.....	58

INFORMATION TECHNOLOGY AND TELECOMMUNICATIONS

<i>Dzyuba S.M., Emelyanova I.I.</i> On recurrent and generalized-recurrent solutions of non-autonomous differential equations.....	68
<i>Burdo G.B., Bolotov A.N.</i> Improving the efficiency of lean manufacturing and quality management tools.....	75
<i>Poletaeva E.V., Gorlov I.V.</i> General relations as a supporting structure of an automated information system of mechanical engineering.....	89
<i>Poletaeva E.V., Gorlov I.V.</i> Implementation of modular principle based on ontology of subject area of mechanical engineering.....	96

МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 620.178.16

ИЗНАШИВАНИЕ ПРИ ФРЕТТИНГЕ: РЕЖИМЫ И ОСНОВНЫЕ ФАКТОРЫ

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

Тверской государственный технический университет
170026, Тверь, наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: iz2v2@mail.ru

© Измайлов В.В., Новоселова М.В., 2024

На модели электроконтактного соединения экспериментально исследовано влияние на процесс изнашивания при фреттинге основных факторов: материала контактирующих деталей, нормальной контактной нагрузки и величины тангенциальных микросмещений. Механизм этого влияния раскрыт с помощью так называемой карты режимов фреттинг-изнашивания. Приведен пример такой карты для исследованных контактных пар. На карте режимов изнашивания выделяются две основные области – область частичного проскальзывания и область существенного проскальзывания в контакте. Все исследованные экспериментально контактные пары попадают в область существенного проскальзывания, в которой основными механизмами фреттинг-изнашивания являются адгезионный и абразивный. Индикатором состояния изнашиваемого соединения служит величина контактного электросопротивления, очень чувствительного к свойствам поверхностей контактирующих деталей. Критерием достижения предельного состояния электроконтактного соединения служит резкий рост контактного сопротивления. Показано, что благодаря оптимальному выбору материала контактирующих деталей, нормальной нагрузки и тангенциальной жесткости контактного соединения можно существенно повысить его ресурс.

Ключевые слова: изнашивание при фреттинге, контактное электросопротивление, карты режимов фреттинг-изнашивания.

DOI: 10.46573/2658-5030-2024-4-5-12

ВВЕДЕНИЕ

Изнашивания при фреттинге и фреттинг-коррозии достаточно распространены и опасны. Одной из разновидностей контактных соединений, в которых наблюдается этот вид изнашивания, являются электрические контакты [1, 2]. Из многочисленных факторов, влияющих на интенсивность изнашивания при фреттинге, выделяют три основных: окружающую среду, параметры контакта и свойства материалов контактирующих деталей. Первый фактор обычно задан назначением и режимом работы контактного соединения, тогда как в выборе материалов контактирующих деталей и параметров контакта имеется определенная свобода. Выбор оптимальных материалов и параметров контакта может существенно повысить надежность электроконтактного соединения. При этом указанный выбор должен происходить исходя из назначения контактного соединения с учетом характера процесса фреттинг-изнашивания и механизма влияния того или иного фактора на этот процесс, иными словами, на основании понимания физики процесса фреттинг-изнашивания.

*Вестник Тверского государственного технического университета.
Серия «Технические науки». № 4 (24), 2024*

Цель работы – исследование влияния материалов контактирующих деталей и основных параметров контакта в условиях изнашивания при фреттинге на модели электроконтактного соединения.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ

Согласно определению, изнашивание при фреттинге – это «механическое изнашивание соприкасающихся тел при колебательном относительном микросмещении» (ГОСТ 27674-88). Обычно к механическому изнашиванию добавляется химическое взаимодействие материалов контакт-деталей с окружающей средой, тогда говорят об изнашивании при фреттинг-коррозии. Величина микросмещения, как видим, не уточняется. В связи с этим к изнашиванию при фреттинге иногда, на наш взгляд, необоснованно относят процессы изнашивания при любых возвратно-поступательных перемещениях контактирующих деталей. В основном в качестве верхней границы микросмещений при фреттинге указываются величины порядка 100...300 мкм [1], однако можно встретить и значение 2,5 мм [3].

Названная неопределенность объясняется тем, что указать границы величин микросмещений, при которых проявляются характерные черты фреттинг-изнашивания, в виде конкретных числовых значений невозможно, так как они зависят от указанных выше основных влияющих факторов. В этой связи более обоснованным является использование так называемых карт режимов изнашивания при фреттинге [4, 5]. Пример подобной карты для контакта двух деталей с первоначальным касанием в точке – сферической и плоской – представлен на рис. 1.

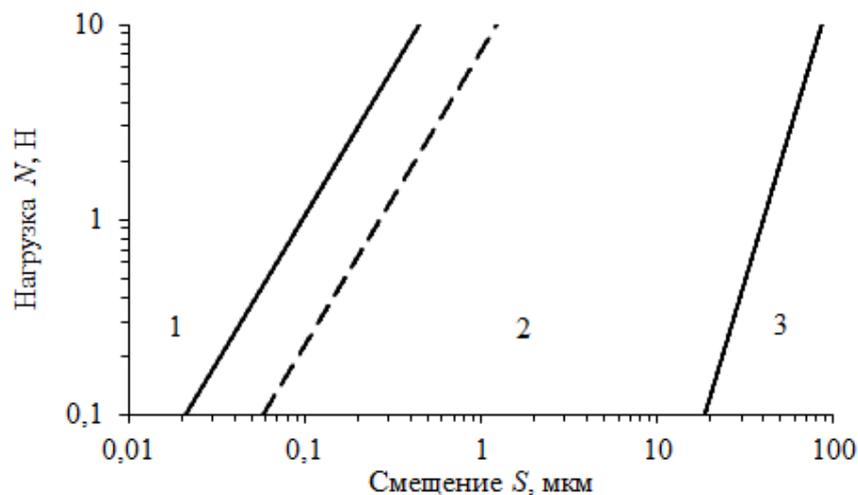


Рис. 1. Пример карты режимов изнашивания при фреттинге:
 1 – область частичного проскальзывания; 2 – область существенного проскальзывания;
 3 – область реверсивного макросмещения контактирующих тел;
 сплошные линии – коэффициент трения $f_c = 0,2$, пунктирная – $f_c = 0,55$

На карте можно выделить три области. Малым величинам относительного смещения контактирующих тел S соответствует область частичного проскальзывания 1 (см. рис. 1). В этой области относительное проскальзывание контактирующих тел под действием приложенной сдвигающей силы отсутствует, однако на площадке контакта с радиусом a наблюдаются две зоны – зона сцепления в центре с радиусом c и кольцевая зона относительного микропроскальзывания на периферии шириной $(a - c)$ (рис. 2а).

Радиус зоны сцепления зависит от величины приложенной сдвигающей силы T и коэффициента сцепления f_c :

$$c = a \left(1 - \frac{T}{f_c N} \right),$$

где N – нормальная нагрузка. При увеличении сдвигающей силы до значения $T = f_c N$ зона проскальзывания распространяется на всю площадку контакта и трение покоя переходит в трение скольжения (рис. 2б). Максимальной силе трения покоя соответствует максимальное значение относительного микросмещения контактирующих тел, т.е. так называемое предварительное смещение $\delta_{\tau \max}$:

$$\delta_{\tau \max} = \frac{1}{2} f_c \left(\frac{2-\mu}{1-\mu} \right) \delta_n, \quad (1)$$

где μ – коэффициент Пуассона; δ_n – нормальная деформация контакта (сближение контактирующих тел). Величина δ_n при этом зависит от нормальной нагрузки N :

$$\delta_n = \left(\frac{9}{16} \cdot \frac{N^2}{RE^{*2}} \right)^{\frac{1}{3}}, \quad (2)$$

где R – радиус сферической детали; E^* – эквивалентный модуль упругости, $\frac{1}{E^*} = \frac{1-\mu_1^2}{E_1} + \frac{1-\mu_2^2}{E_2}$ (E_1, E_2, μ_1, μ_2 – модули упругости и коэффициенты Пуассона контактирующих тел).

В итоге параметрическая зависимость $S(N) = \delta_{\tau \max}(N)$, выражаемая формулами (1) и (2), образует границу зон 1 и 2 (см. рис. 1). Точки с координатами (N, S) , попадающие в область 1 ($S \leq \delta_{\tau \max}$), соответствуют режиму частичного проскальзывания, точки с координатами (N, S) , попадающие в область 2, – режиму существенного проскальзывания.

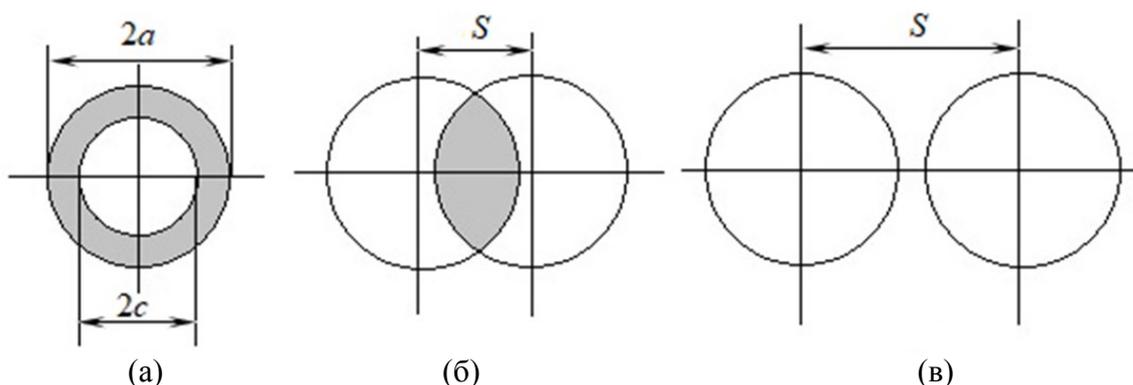


Рис. 2. Схема контакта двух тел при фреттинг-изнашивании: режим частичного проскальзывания (а); режим существенного проскальзывания (б); режим реверсивного макросмещения контактирующих тел (в)

Область существенного проскальзывания соответствует схеме контакта (см. рис. 2б). Контактующие тела перешли от режима трения покоя к режиму трения скольжения, при этом их взаимный контакт частично сохраняется (затемненная

область, см. рис. 2б). Очевидно, что максимальная величина относительного смещения S контактирующих тел, при котором сохраняется их частичный контакт, равна диаметру пятна контакта $2a$. Радиус площадки контакта зависит от нормальной нагрузки:

$$a = \left(\frac{3}{4} \cdot \frac{NR}{E^*} \right)^{\frac{1}{3}}, \quad (3)$$

соответственно, правая граница области существенного проскальзывания на карте режимов трения определяется зависимостью $S(N)$ при $S = 2a$ с учетом уравнения (3).

При $S > 2a$ (см. рис. 2в) процесс изнашивания утрачивает характерные для фреттинга особенности: затрудненное или полностью отсутствующее удаление продуктов износа из зоны контакта, невозможность визуального контроля состояния контакта и т.п. По сути, процесс изнашивания протекает так, как в обычном скользящем контакте при однонаправленном трении (область 3 на карте режимов фреттинг-изнашивания).

С помощью карты режимов фреттинг-изнашивания можно установить преобладающий механизм процесса. В области частичного проскальзывания преобладает усталостный механизм изнашивания с образованием трещин и последующим отделением частиц износа. В области существенного проскальзывания преобладают уже адгезионный и абразивный механизмы изнашивания [6, 7].

ОБРАЗЦЫ И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Экспериментально исследовано влияние определяющих факторов на процесс и результат фреттинг-изнашивания на физической модели точечного электрического контакта сферической и плоской контакт-деталей. Контактная пара «сфера/плоскость» использовалась многими исследователями изнашивания при фреттинге [8]. Индикатором состояния контакта в процессе изнашивания служило контактное электрическое сопротивление, которое очень чувствительно к состоянию поверхности контактирующих тел в зоне контакта. Вертикально расположенный и неподвижный в горизонтальном направлении верхний пальчиковый образец диаметром 2 мм своей сферической вершиной с радиусом закругления 1 мм контактировал с плоской поверхностью нижнего образца. Нормальная нагрузка на контакт создавалась с помощью разновесов. Нижний плоский образец совершал горизонтальные перемещения малой амплитуды вместе с опорной платформой, на которой он жестко закреплен. Малые горизонтальные перемещения создавались изгибной деформацией консольной балки, на которой жестко расположена опорная платформа. Напряжение балки обеспечивается механическим приводом с частотой 1 Гц. Величина тангенциальных смещений платформы с плоским образцом измерялась индикатором малых перемещений.

Контактное электросопротивление R_c измеряли по классической четырехпроводной схеме. Постоянный ток силой 1 А пропускали через контакт от источника стабилизированного постоянного тока, контактную разность потенциалов ΔU измеряли цифровым милливольтметром. Очевидно, при силе тока 1 А численно $R_c = \Delta U$.

Материалы образцов: верхнего (пальчикового со сферической вершиной) – во всех экспериментах вольфрам, нижнего – латунь марки Л63 с покрытиями из различных металлов толщиной порядка 5 мкм.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты экспериментов представлены далее в виде графиков зависимости контактного электросопротивления от пути трения. В качестве аргумента этих зависимостей выбрана величина пути трения, а не число циклов тангенциального смещения (как, например, в работе [1]). Число циклов тангенциальных смещений важно при усталостном характере изнашивания, который преобладает в режиме частичного проскальзывания (область 1, см. рис. 1). Все исследованные контактные пары попадают в область существенного проскальзывания на карте режимов фреттинга (см. рис. 1), в которой преобладают адгезионное и абразивное виды изнашивания. В этих случаях в трибологии ресурс фрикционного соединения обычно характеризуется величиной пути трения (например, при расчете интенсивности изнашивания). При этом очевидно, что число циклов $n_{ц}$ однозначно связано с величиной пути трения $L_{тр}$: $n_{ц} = \frac{L_{тр}}{2S}$, где S – величина тангенциального смещения.

Влияние материала контактирующих деталей на процесс фреттинг-изнашивания показано на рис. 3. Во-первых, надо отметить, что начальные величины контактного сопротивления превосходят теоретические значения для всех контактных пар, которые находятся в интервале от 1,1 мОм для контакта W/Ag до 2,7 мОм для контакта W/Sn. Это свидетельствует о наличии физически и химически адсорбированных пленок на контактирующих поверхностях. При этом в начальный период испытаний контактное сопротивление в паре вольфрамового образца с серебряным и никелевым покрытиями уменьшается из-за разрушения этих пленок при тангенциальных микросмещениях. Такое изменение контактного электросопротивления характерно для начальной стадии фреттинг-изнашивания [1].

В дальнейшем сопротивление контактов W/Ag и W/Ni флуктуирует в диапазоне нескольких десятков миллиомов на пути трения до 3...3,5 м, резко возрастая затем в десятки раз. В контакте W/Sn существенное увеличение контактного сопротивления происходит уже при пути трения менее метра (рис. 3в). Таким образом, пара трения с оловянным покрытием существенно уступает по износостойкости парам трения W/Ag и W/Ni.

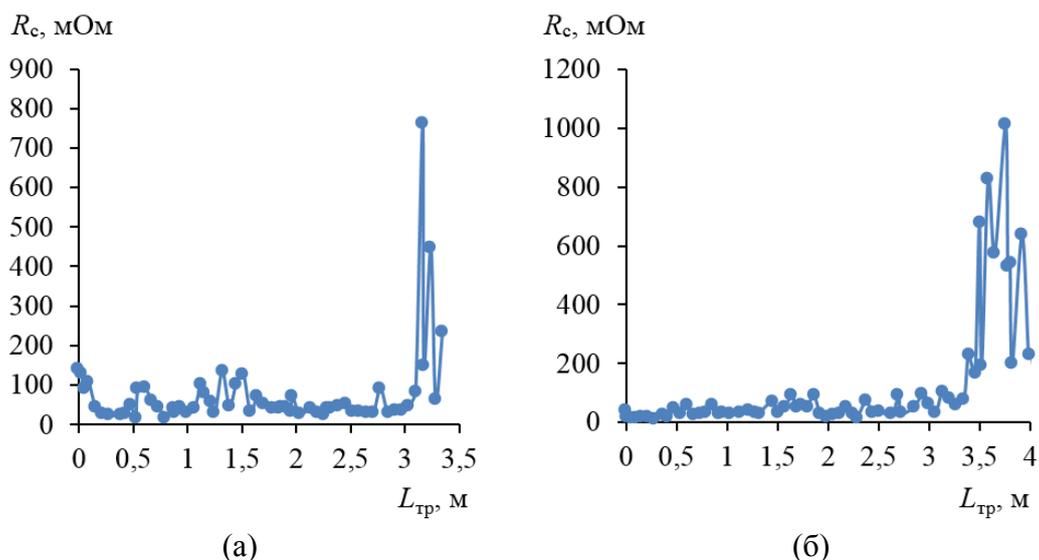


Рис. 3. Зависимость контактного электросопротивления R_c от пути трения для контактных пар: W/Ni (покр.) (а); W/Ag (покр.) (б); W/Sn (покр.) (в); нагрузка $N = 0,5$ Н; тангенциальное смещение $S = 18$ мкм

Иная картина наблюдается при величине тангенциального микросмещения 28 мкм (см. рис. 4б). На карте режимов фреттинг-изнашивания (см. рис. 1) соответствующая точка располагается практически на границе областей существенного проскальзывания и реверсивного трения. Продукты изнашивания достаточно легко удаляются из зоны трения (см. рис. 2в), поэтому на протяжении пути трения $L_{тр} \approx 0,25$ м сопротивление остается практически на начальном уровне.

Наконец, влияние еще одного существенного фактора – нормальной нагрузки – на процесс изнашивания при фреттинге показано на рис. 5. При небольшой нормальной нагрузке 0,8 Н заметные флуктуации контактного сопротивления с превышением начального значения в 2...3 раза возникают уже на пути трения $L_{тр} \approx 15...20$ см (рис. 5а). При нормальной нагрузке 5 Н значительные превышения начального значения контактного сопротивления начинаются, когда путь трения на порядок больше – при $L_{тр} \approx 1,5–2,0$ м (рис. 5б). Но даже в этом случае величина контактного сопротивления остается сравнительно небольшой – 20...40 мОм, что в десятки раз меньше, чем при нагрузке 0,8 Н.

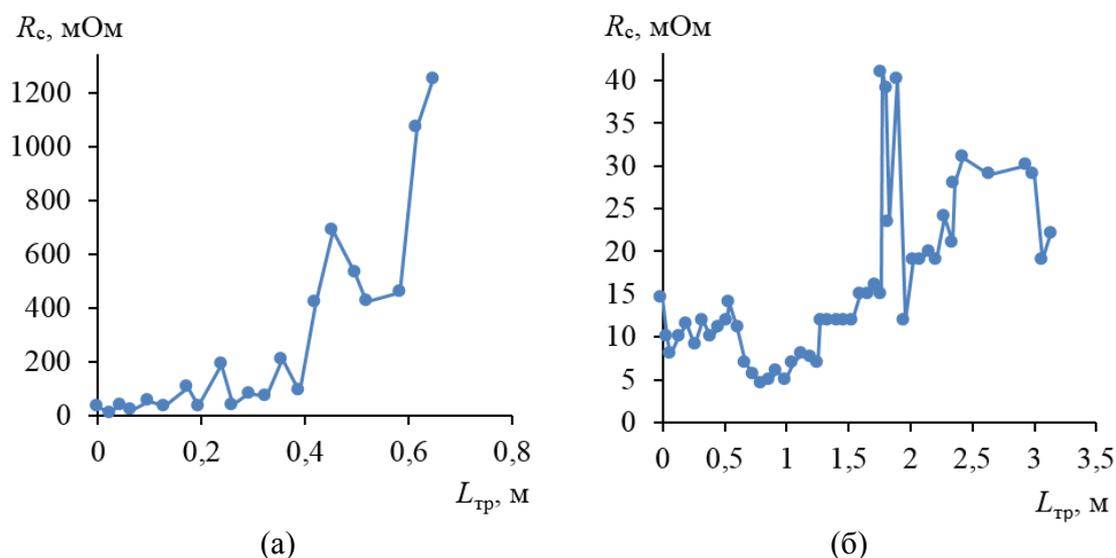


Рис. 5. Влияние нормальной контактной нагрузки N на зависимость контактного электросопротивления R_c от пути трения для контактной пары W/Sn (покр.):
 $N = 0,8$ Н (а); $N = 5$ Н (б); тангенциальное смещение – 18 мкм

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе анализа влияния основных факторов на процесс изнашивания при фреттинге целесообразно использовать карты режимов фреттинг-изнашивания. Пример такой карты показан на рис. 1. Дело в том, что в зависимости от режима изнашивания ключевую роль играют различные факторы. Например, в режиме частичного проскальзывания, когда преобладает усталостный механизм изнашивания, важны частота тангенциальных смещений и усталостная прочность материалов. В режиме существенного проскальзывания значимы адгезионные свойства материалов, их твердость, склонность к образованию окисных и других поверхностных пленок, амплитуда тангенциальных смещений. Используя карты режимов фреттинг-изнашивания, можно подобрать оптимальные параметры контактного соединения, обеспечивающие требуемый ресурс.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мышкин Н.К., Кончиц В.В., Браунович М. Электрические контакты. Долгопрудный: Интеллект. 2008. 560 с.
2. Braunovic M. Power Connectors // *Electrical contacts. Principles and applications*. CRC Press. 2014. P. 231–373.
3. Хопин П.Н., Шишкин С.В. Трибология: учебник для вузов. М.: Юрайт. 2021. 235 с.
4. Vingsbo O., Söderberg S. On fretting maps // *Wear*. 1988. V. 126. № 2. P. 131–147.
5. Измайлов В.В., Левыкин Д.А. Жесткость контакта и его фреттингостойкость. *Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел, деталей технологического и энергетического оборудования: межвуз. сб. науч. тр.* / под ред. В.В. Измайлова. Тверь: ТвГТУ. 2013. Вып. 6. С. 4–9.
6. Liskiewicz T., Dini D., Liu Y. Transition criteria and mapping approaches // *Fretting wear and fretting fatigue. Fundamental principles and applications*. Elsevier Inc. 2023. P. 37–44.
7. Kapsa P., Fouvry S., Vincent L. Basic principles of fretting // *Wear – Materials, Mechanisms and Practice*. John Wiley & Sons, Ltd. 2005. P. 317–338.
8. Dini D., Liskiewicz T. Contact mechanics in fretting // *Fretting wear and fretting fatigue. Fundamental principles and applications*. Elsevier Inc. 2023. P. 31–37.

Для цитирования: Измайлов В.В., Новоселова М.В. Изнашивание при фреттинге: режимы и основные факторы // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2024. № 4 (24). С. 5–12.

FRETTING WEAR: REGIMES AND KEY FACTORS

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

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

Using a model of an electrical contact connection, the influence of the key factors on the fretting wear process was experimentally studied. They are as follows: the material of the contacting parts, the normal contact load and the magnitude of tangential microdisplacements. The mechanism of this influence is revealed using the so-called map of fretting wear regimes. An example of such a map for the studied contact pairs is given. On the map of wear regimes, two main areas are distinguished – the area of partial slip and the area of gross slip in contact. All experimentally studied contact pairs fall into the gross slip area, in which the main fretting wear mechanisms are adhesive and abrasive. An indicator of the condition of a worn connection is the value of contact electrical resistance, which is very sensitive to the properties of the surfaces of the contacting parts. The criterion for achieving the limiting state of an electrical contact connection was a sharp increase in contact resistance. It is shown that the optimal choice of material for the contacting parts, normal load and tangential rigidity of the contact connection can significantly increase its service life

Keywords: fretting wear, contact electrical resistance, maps of fretting wear regimes.

Поступила в редакцию/received: 17.07.2024; после рецензирования/revised: 02.08.2024;
принята/accepted: 28.08.2024

ОБРАБОТКА ТЕХНИЧЕСКОЙ КЕРАМИКИ АБРАЗИВНЫМ АЛМАЗНЫМ ИНСТРУМЕНТОМ

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

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

© Болотов А.Н., Новиков В.В., Новикова О.О., 2024

В работе исследованы триботехнические характеристики инструмента из композиционного материала, представляющего собой керамическую матрицу из оксида алюминия, упрочненную микродисперсными зёрнами алмазов. На основе классического подхода к деформированию шероховатых поверхностей построена модель, позволяющая оценить влияние структурных компонентов инструмента из алмазного минералокерамического материала на износ технической керамики. Получены соотношения для расчета производительности шлифования, содержания алмазов в изношенном слое абразивного инструмента и величины удельного расхода алмазов. Проведенные экспериментальные исследования подтвердили теоретические выводы. Установлено, что наибольшее влияние на производительность шлифования оказывают зернистость алмазов, нагрузочно-скоростные режимы. Отмечено, что концентрация алмазов существенно определяет относительную износостойкость абразивного инструмента. Полученные соотношения будут полезны при проектировании алмазосодержащих инструментов для обработки технической керамики.

Ключевые слова: абразивный алмазный инструмент, алмазная минералокерамика, обработка керамики, модель контактного взаимодействия, производительность шлифования, износ алмазного инструмента.

DOI: 10.46573/2658-5030-2024-4-13-21

ВВЕДЕНИЕ

Область применения технической керамики традиционно очень широка. Ее используют в качестве конструкционных материалов в машиностроении, приборостроении, авто- и авиастроении, в электротехнической промышленности и вычислительной технике и др. [1, 2]. Благодаря высокой твердости, износостойкости, термостойкости, керамику успешно применяют в узлах трения и для изготовления абразивного, твердосплавного инструмента. Однако эти же уникальные свойства определяют сложность обработки керамических материалов до стадии получения готового изделия. Формообразование материалов данного типа возможно осуществить только более твердым керамическим или алмазосодержащим инструментом [1–3].

Разработанная нами технология получения алмазосодержащего минералокерамического материала позволила синтезировать инструментальный композит, соединяющий режущие свойства алмаза и керамической матрицы из оксида алюминия [4–6]. Полученный материал показал более высокую производительность (в 1,3...3,3 раза) при обработке технической керамики по сравнению с традиционными алмазосодержащими инструментами с металлической и органической связками [5]. Изнашивание керамическим алмазным инструментом происходит настолько быстро,

что сложно зафиксировать требуемые геометрические размеры изделия и прекратить обработку. Композит характеризуется близкими механическими свойствами алмаза и керамической связки, высоким алмазодержанием, способностью сопротивляться деформированию при повышенных температурах. Технология получения алмазосодержащего композита предполагает варьирование структурными компонентами: зернистостью, концентрацией алмаза, степенью его графитизации и металлизации и др. Повысить эксплуатационные параметры алмазного керамического инструмента можно, если связать физико-механические свойства его составляющих со свойствами обрабатываемой керамики и нагрузочно-скоростными условиями резания. Фактически это означает спроектировать состав алмазосодержащего минерало-керамического материала под обработку конкретной технической керамики.

При анализе механики разрушения алмазосодержащего композита было проведено исследование морфологии рабочей поверхности инструмента после изнашивания, которое показало отсутствие следов абразивного износа и признаков «засаливания» режущих кромок алмазов. Установлено, что материал работает в режиме самозатачивания: изношенные алмазные зерна выкрашиваются вместе с частью окружающей их керамической матрицы, обнажая новый режущий слой. По результатам экспериментов можно предположить, что контакт алмазосодержащего минералокерамического материала с обрабатываемой керамической поверхностью носит упругий характер, а при возрастании нагрузки сопровождается последующим хрупким разрушением вершин микронеровностей.

Теоретическому моделированию изнашивания керамических материалов уделено достаточно большое внимание [7–10]. Наиболее распространенными теоретическими подходами в настоящее время являются линейная механика упругого разрушения и статистика Вейбулла [7, 11, 12]. Природа износа алмазосодержащих материалов с керамической матрицей изучена менее подробно. Сложность задачи заключается в эмерджентном соединении физико-механических свойств структурных компонентов композиционного материала [2, 13–15].

Авторы, экспериментально исследовавшие абразивный износ алмазосодержащих керамических материалов, подчеркивают, что они разрушаются хрупко, без заметных следов пластической деформации, в отличие от алмазосодержащих материалов с менее твердыми матрицами. В работе [2] получены данные об инвариантном линейно-упругом характере износа абразивных алмазосодержащих керамических инструментов.

Больше исследований посвящено алмазосодержащим материалам с традиционными матрицами: органической, металлической [2, 16]. В этих случаях при построении модели контактного взаимодействия «абразивный инструмент – деталь» рекомендуется использовать математические модели упругого, хрупкого, упругопластического контакта (последний определяется нагрузочно-скоростными режимами обработки). Но даже при применении низкомолекулярных связей (по сравнению с керамикой) авторы подчеркивают, что наиболее типичным и предпочтительным механизмом взаимодействия для устойчивой эксплуатации абразивного инструмента является упругое взаимодействие. Кроме того, известные математические модели не учитывают физико-механические свойства всех структурных элементов композиционных материалов, их размеры и микрогеометрические параметры контактирующих поверхностей. Модели износа часто опираются на эмпирические коэффициенты, и в них не берется в расчет специфика абразивного изнашивания именно керамики [7–16].

Цель работы – провести анализ влияния структурных компонентов инструмента из алмазного минералокерамического материала и нагрузочно-скоростных режимов обработки на износ технической керамики.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

При расчете фрикционных параметров будем использовать основное уравнение изнашивания [17, 18]. В модели должны быть учтены физико-механические свойства пары трения «алмазосодержащая минералокерамика – керамика», их микрогеометрия и условия нагружения. Предположим, что контакт микронеровностей на поверхностях трения абразивных алмазосодержащих керамических инструментов носит линейно-упругий характер.

Рассмотрим контактное взаимодействие шероховатой поверхности упругого изнашиваемого керамического контробразца и упругого шероховатого полупространства, представляющего собой керамическую матрицу с распределенными в ней дисперсными зёрнами алмазов и перемещающегося по названной поверхности (рис. 1). Поверхность композиционного материала будем моделировать набором сферических сегментов одинакового радиуса R , зёрна алмаза распределены в материале с объёмной плотностью τ . Используем понятие эквивалентной поверхности [17], вершины микронеровностей которой распределены по степенному закону таким образом, чтобы распределение материала в поверхностном слое модели и реальной поверхности описывалось одинаковой опорной кривой. Для описания характеристик контакта единичной микронеровности применим формулы Герца [19], учитывая значительную толщину керамического алмазосодержащего слоя, сформированного на поверхности алюминиевой основы. Принимая во внимание, что в большинстве реальных трибосопряжений плотность контакта мала, взаимным влиянием микронеровностей можно пренебречь [18].

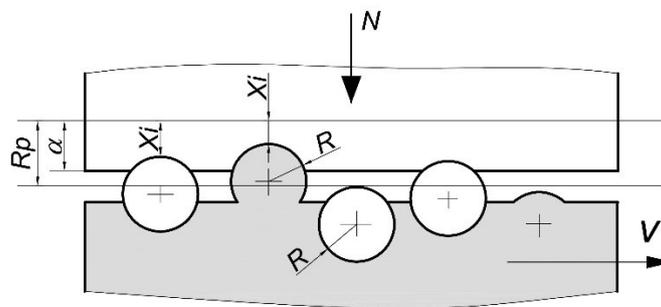


Рис. 1. Схема контакта шероховатого композиционного полупространства и поверхности керамического контробразца

МЕТОД РЕШЕНИЯ

Приложенную нагрузку в зоне контакта N представим суммой сил, воспринимаемых зёрнами алмаза и микронеровностями матрицы:

$$N = \tau \int_0^a N_{i \text{ ак}}(a_i) n'(x) dx + (1 - \tau) \int_0^a N_{i \text{ ск}}(a_i) n'(x) dx, \quad (1)$$

где $N_{i \text{ ак}}(a_i)$ и $N_{i \text{ ск}}(a_i)$ – силы, действующие на единичное зерно алмаза и единичную микронеровность материала матрицы; $n'(x)$ – производная по x от функции распределения выступов.

Примем функцию распределения выступов в виде $n(x) = \frac{tmvA_a}{2\pi RRp^v} x^{v-1}$, где $n(x)$ – число выступов, вершины которых расположены выше уровня x , v ; Rp , tm – параметры шероховатости взаимодействующих поверхностей [17, 18]; A_a – номинальная площадь контакта. Используя соотношения Герца для расчета характеристик упругого контакта единичных сферических неровностей и учитывая, что $a_i = a - x$, из уравнения (1) получим суммарную нагрузку в зоне контакта:

$$N = \frac{tmv(v-1)A_a a^{v+0,5} K_3}{1,5\pi R p^v} \left(\frac{\tau}{I_a} + \frac{(1-\tau)}{I_c} \right), \quad (2)$$

где K_3 – параметр шероховатости взаимодействующих поверхностей [17, 18]; $I_a = \frac{1-\mu_a^2}{E_a} + \frac{1-\mu_k^2}{E_k}$; $I_c = \frac{1-\mu_c^2}{E_c} + \frac{1-\mu_k^2}{E_k}$ (E_a , E_c , E_k – модули упругости материалов алмаза, матрицы и контробразца; μ_a , μ_c , μ_k – коэффициенты Пуассона материалов алмаза, матрицы и контробразца). Из уравнения (2) выразим упругое сближение a шероховатой керамической матрицы с распределенными в ней дисперсными зёрнами алмазов и шероховатого керамического контробразца:

$$a = Rp \left[\frac{1,5\pi q_a}{tmv(v-1)K_3} \left(\frac{R}{Rp} \right)^{0,5} \right]^{\frac{1}{v+0,5}} (I_3)^{\frac{1}{v+0,5}}, \quad (3)$$

где $q_a = \frac{N}{A_a}$ – номинальное давление в контакте, $I_3 = \left(\frac{I_a I_c}{\tau I_c + (1-\tau) I_a} \right)$ – эквивалентная упругая постоянная.

Положим, что абразивное формообразование взаимодействующих деталей определяет суммарный объем V внедрившихся неровностей:

$$V = V_1 + V_2,$$

где V_1 и V_2 – деформированный объем обрабатываемой детали и абразивного инструмента. Согласно источникам [17, 18],

$$V = \frac{A_r \cdot a}{v+1}, \quad (4)$$

$$A_r = 0,5tmA_a \left(\frac{a}{Rp} \right)^v, \quad (5)$$

где A_r – фактическая площадь контакта. Используя выражения (3)–(5), суммарный объем V внедрившихся неровностей можно выразить следующим образом:

$$V = \frac{A_a tmRp}{2(v+1)} \left[1,5 \frac{\pi q_a I_3}{tmv(v-1)K_3} \left(\frac{R}{Rp} \right)^{0,5} \right]^{\frac{v+1}{v+0,5}}. \quad (6)$$

Учитывая, что A_r для обеих поверхностей одинакова, а внедрение шероховатой поверхности a определяется внедрением единичных микронеровностей, можно записать:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{a_{i1}}{a_{i2}}.$$

Определив внедрение единичных микронеровностей из материалов детали a_{i1} и образца a_{i2} по теории Герца [19], для деформированных объемов получим:

$$V_1 = V \frac{I_k}{I_3}; \quad V_2 = V \frac{I_{ac}}{I_3}, \quad (7)$$

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

Исходя из того, что глубина шлифования минералокерамическим алмазосодержащим материалом керамической поверхности равна величине упругого внедрения зерна [18, 19], и используя выражения (6) и (7), получим уравнение для расчета производительности шлифования Q_t :

$$Q_t = \frac{SvtmRp}{2(v+1)n} \left[\frac{1,5\pi q_a I_3}{tmv(v-1)K_3} \left(\frac{R}{Rp} \right)^{0,5} \right]^{\frac{v+1}{v+0,5}} \frac{I_k}{I_3}, \quad (8)$$

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 $n = 1$ [17, 18].

Данное уравнение соответствует экспериментальным результатам, полученным в работе [1] при шлифовании алмазосодержащими композиционными керамическими материалами. Для алмазов зернистостью 100/80 мкм производительность шлифования прямо пропорциональна скорости взаимного перемещения инструмента и детали, а также давлению на контакте в степени 1, 2 (для характерного при алмазно-абразивной обработке керамики значения $v = 2$, по нашим данным, степень также равна 1, 2).

Учитывая, что за 100%-ю концентрацию алмаза K в алмазосодержащем материале принимают содержание алмазного порошка в количестве 4,39 кар/см³, содержание алмазов m_a в изношенном слое абразивного инструмента за время шлифования t можно рассчитать по формуле

$$m_a = \frac{8,78 \cdot K S v t m R p t m}{2(v+1)n} \left[\frac{1,5\pi q_a I_3}{tmv(v-1)K_3} \left(\frac{R}{Rp} \right)^{0,5} \right]^{\frac{v+1}{v+0,5}} \left[\frac{I_{ac}}{I_3} \right]. \quad (9)$$

Износ алмазосодержащих абразивных инструментов характеризуется величиной удельного расхода алмазов q_v , определяемой как отношение массы алмазов в изношенном абразивном слое к объему (массе) материала контрообразца, сошлифованного за испытание. Учитывая уравнения (7) и (9), получим

$$q_v = 8,78K \left[\frac{I_{ac}}{I_3} \right]. \quad (10)$$

При анализе абразивного износа в работах [17, 20] для широкого класса твердых материалов и минералов также подтверждается вывод о том, что относительная износостойкость пропорциональна только модулю упругости образцов. В нашей модели модуль упругости композиционного алмазосодержащего материала зависит также и от концентрации алмазных зерен.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Фрикционные испытания проводились на машине трения МТ-2 [21]. Реализована схема трения «палец – кольцо», в качестве смазки использована техническая вода. Оценивались производительность шлифования алмазосодержащим композитом контрообразца из электротехнической керамики (ультрафарфора) и износ непосредственно алмазного инструмента. Относительная погрешность результатов не превышала 12 %.

Анализ структуры режущей поверхности минералокерамического абразивного образца и морфологии обрабатываемой поверхности контрообразца проводился с помощью металлографического микроскопа и стандартных методов профилометрии (ГОСТ 19300-86) [22]. Внешний вид испытываемых образцов минералокерамических абразивных кругов представлен на рис. 2.



Рис. 2. Испытываемые образцы минералокерамических абразивных кругов

На рис. 3а показано существенное влияние нагрузки в зоне трибоконтакта на производительность шлифования для выбранной пары материалов. Согласно формуле (8), производительность шлифования возрастает с увеличением давления. При увеличении зернистости алмазов Q_t возрастает теоретически (8) и по результатам испытаний (рис. 3а). Длительность стабильной работоспособности алмазосодержащего композита показана на рис. 3б. Установлено, что работоспособность инструмента практически не снижается за все время испытаний. Морфологический анализ поверхности трения алмазного абразивного инструмента подтвердил, что последний не подвержен засаливанию: изношенные зерна выкрашиваются с частью матрицы, своевременно обнажая нижележащие алмазы. При этом «изношенные» зерна не удаляются из зоны трения, а продолжают дополнительно изнашивать деталь. При применении алмазов большей зернистости производительность шлифования существенно больше, но характер зависимости не изменяется (рис. 3б, (8)).

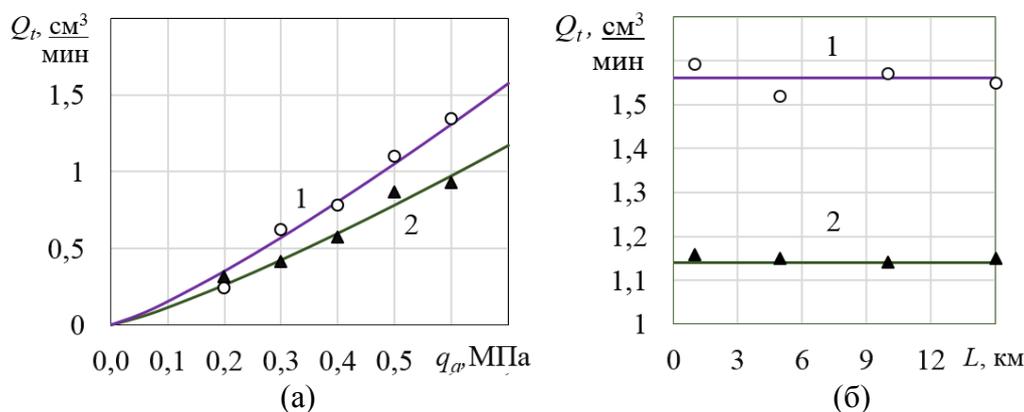


Рис. 3. Влияние давления q_a (а) и пути резания L (б) на производительность шлифования Q_t . Сплошные линии – расчет по формуле (8); точки – результаты эксперимента: 1 – $d = 100/80$; 2 – $d = 63/50$

В результате испытаний не зафиксировано существенного влияния концентрации зерен алмаза на производительность шлифования. Частично это объясняется близкими механическими свойствами алмазного зерна и корундовой матрицы. С увеличением количества контактирующих зерен алмаза снижается нагрузка на каждое отдельное зерно, а объем сошлифованного материала меняется незначительно. Кроме того, сыграло роль и то, что прочностные свойства обрабатываемой керамики в нашем эксперименте ниже алмазосодержащего абразива. При близких модулях упругости материалов алмаза, матрицы и контрообразца влияние концентрации на упругие постоянные I_3 и I_{ac} более значительно.

Износ инструмента из алмазосодержащей минералокерамики оценивали по содержанию алмазов в изношенном алмазосодержащем слое (рис. 4а) и величине удельного расхода алмазов (рис. 4б). На рис. 4 показаны результаты расчетов по формулам (9) и (10) в сопоставлении с результатами эксперимента. Масса израсходованных алмазов возрастает при повышении нагрузки, зернистости и концентрации зерен, при увеличении площади контакта «инструмент – деталь» (9). Концентрация алмазов существенно определяет относительную износостойкость (удельный расход алмазов). Зависимость не прямо пропорциональная, так как концентрация структурных элементов также определяет упругую постоянную композиционного материала. Теоретические и опытные параметры износа алмазного минералокерамического инструмента имеют схожие тенденции изменения, но погрешность данных испытаний несколько выше.

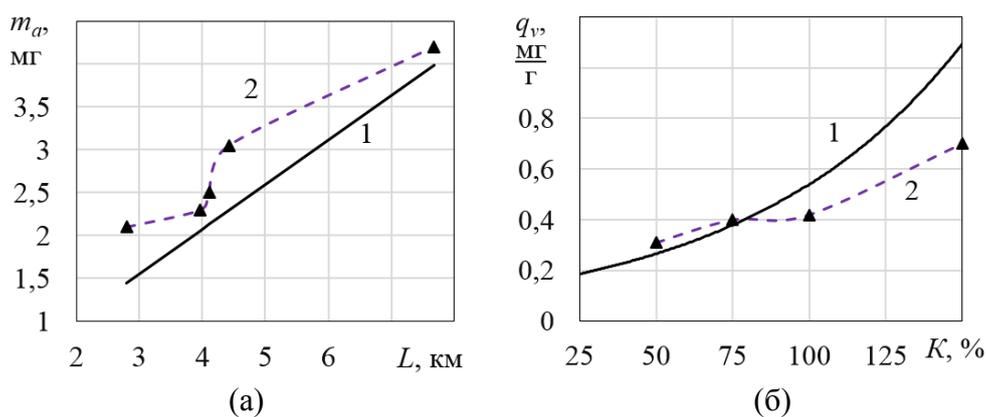


Рис. 4. Влияние пути резания L на содержание алмазов m_a в изношенном слое абразивного инструмента (а) и концентрации алмазов K на удельный расход алмазов q_v (б):
1 – расчет по формулам (9) и (10);
2 – результаты эксперимента ($q_a = 0,5$ МПа; $d = 63/50$; $K = 150$ %)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных теоретических и экспериментальных исследований была установлена связь между характеристиками структурных компонентов алмазосодержащего керамического абразивного инструмента и основными параметрами изнашивания при формообразовании детали из технической керамики. Результаты экспериментальных исследований подтвердили правомерность выбранного метода расчета и принятых при этом допущений.

Установлено, что при увеличении скорости скольжения, приложенной нагрузки и зернистости алмаза возрастает износ керамической детали и алмазосодержащего

абразива: увеличивается производительность шлифования керамики, растет содержание алмазов в изношенном слое абразивного инструмента. Концентрация алмазов не оказала существенного влияния на данные характеристики. Удельный расход алмазов пропорционален концентрации алмазов и зависит от модуля упругости контактирующих материалов.

Полученные зависимости параметров износа технической керамики и алмазного минералокерамического инструмента позволяют на этапе проектирования материалов данного типа оптимизировать зернистость, концентрацию алмазов, нагрузочные и скоростные режимы эксплуатации инструмента с целью повышения параметров их работоспособности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дроздов Ю.Н. Обобщенные факторы для характеристики изнашивания технической керамики // *Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения*. 2004. № 3. С. 13–22.
2. Судник Л.В., Витязь П.А., Ильющенко А.Ф. Алмазосодержащие абразивные нанокompозиты. Минск: Беларуская навука. 2012. 319 с.
3. Rahaman M.N. *Ceramic Processing and Sintering*. Second Edition. CRC Press. 2017. 875 p.
4. 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.
5. 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.
6. Болотов А.Н., Новиков В.В., Новикова О.О. Синтез абразивных инструментов с алмазным керамическим покрытием для прецизионной микрообработки сверхтвердых материалов // *Все материалы. Энциклопедический справочник*. 2020. № 4. С. 30–37.
7. Дроздов Ю.Н., Надеин В.А., Савинова Т.М. Обобщенные характеристики для определения ресурса по износу технической керамики // *Трение и износ*. 2008. Т. 29. № 1. С. 22–28.
8. Sharma S.K., Kumar B.V.M., Kim Y.W. Tribological Behavior of Silicon Carbide Ceramics. A review // *Journal of the Korean Ceramic Society*. 2016. V. 53. P. 581–596.
9. Gogotsi Y.G., Koval'chenko A.M., Osipova I.I., Yaroshenko V.P. Wear Resistance of $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiN}$ Ceramics in its Friction against Diamond Abrasive // *Sverkhтвердые Materialy*. 1992. № 3. P. 20–25.
10. Wang Y., Hsu S.M. Wear and Wear Transition Mechanisms of Ceramics // *Wear*. 1996. V. 195. P. 112–122.
11. Морозов Е.М., Зернин М.В. Контактные задачи механики разрушения. М.: URSS. 2017. 544 с.
12. Ворович И.И., Александров В.М. Механика контактных взаимодействий. М.: Физматлит. 2001. 336 с.
13. Залеснов А.И., Петухов Е.Н., Аборкин А.В. Исследование механизма и разработка модели износа алмазного инструмента при тчении алюмоматричных композиционных материалов // *Трение и износ*. 2017. Т. 38. № 5. С. 445–453.
14. Болотов А.Н., Новиков В.В., Новикова О.О. Твердосмазочные керамические покрытия с нано- и микродисперсным наполнителем // *Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов*. 2018. № 10. С. 150–158.

15. Fedorenko D.O., Fedorovich V.A., Fedorenko E.Yu., Daineko K.B. Ceramic-matrix composite materials for the diamond abrasive tools manufacture // *Scientific Research on Refractories and Technical Ceramics*. 2017. V. 117. P. 212–224.
16. Чеповецкий И.Х. Механика контактного взаимодействия при алмазной обработке. Киев: Наукова думка. 1978. 227 с.
17. Крагельский И.В., Добычин М.Н., Комбалов В.С. Основы расчетов на трение и износ. М.: Машиностроение. 1977. 526 с.
18. Чичинадзе А.В., Берлинер Э.М., Браун Э.Д. Трение, износ, смазка (трибология и триботехника). М.: Машиностроение. 2003. 576 с.
19. Johnson K.L. Contact Mechanics. Cambridge University Press, 6. Nachdruck der 1. Auflage. 2001. 452 p.
20. Хрущов М.М., Бабичев М.А. Абразивное изнашивание. М.: Наука. 1970. 252 с.
21. Болотов А.Н., Новикова О.О., Новиков В.В. Синтез композиционного керамического материала и исследование его абразивных свойств // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2020. № 3 (7). С. 22–31.
22. ГОСТ 19300-86. Средства измерений шероховатости поверхности профильным методом. Профилографы-профилометры контактные. Типы и основные параметры. М.: Изд-во стандартов, 1996. 10 с.

Для цитирования: Болотов А.Н., Новиков В.В., Новикова О.О. Обработка технической керамики абразивным алмазным инструментом // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2024. № 4 (24). С. 13–21.

PROCESSING OF TECHNICAL CERAMICS WITH AN ABRASIVE DIAMOND TOOL

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

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

The work investigated the tribological characteristics of a tool made of a composite material, which is a ceramic matrix of aluminum oxide, strengthened with microdispersed diamond grains. Based on the classical approach to the deformation of rough surfaces, a model has been constructed that allows us to evaluate the influence of the structural components of a tool made of diamond mineral-ceramic material on the wear of technical ceramics. Relationships have been obtained for calculating grinding productivity, the diamond content in the worn layer of an abrasive tool, and the specific consumption of diamonds. The experimental studies carried out confirmed the theoretical conclusions. It has been established that the diamond grain size and load-speed conditions have the greatest influence on grinding performance. It is noted that the concentration of diamonds significantly determines the relative wear resistance of abrasive tools. The obtained relationships will be useful in the design of diamond-containing tools for processing technical ceramics.

Keywords: abrasive diamond tools, diamond mineral ceramics, ceramic processing, contact interaction model, grinding performance, wear of diamond tools.

Поступила в редакцию/received: 27.08.2024; после рецензирования/ revised: 05.09.2024;
принята/accepted: 09.09.2024

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЛАЗЕРНОЙ РЕЗКИ НА РАЗМЕР ЗОНЫ ЛАЗЕРНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

Д.А. БАРЧУКОВ, канд. техн. наук, И.А. СМОЛЯКОВА, канд. техн. наук,
Л.Е. АФАНАСЬЕВА, канд. физ.-мат. наук

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

© Барчуков Д.А., Смолякова И.А., Афанасьева Л.Е., 2024

В статье отмечено, что на основе использования методов исследования тепловых процессов при сварке был выполнен анализ зоны лазерного воздействия, образующейся во время лазерной резки быстрорежущей стали. Показано, что на размер закаленного слоя большое влияние оказывает скорость лазерной резки. Напротив, изменение мощности лазерного излучения не приводит к существенному изменению размера зоны лазерного воздействия. Результаты выполненной работы могут быть полезны при разработке новых способов изготовления и упрочнения инструмента из быстрорежущей стали.

Ключевые слова: быстрорежущая сталь, лазерная резка, технологические параметры, зона лазерного воздействия.

DOI: 10.46573/2658-5030-2024-4-22-28

ВВЕДЕНИЕ

Технология лазерной резки получила широкое распространение во всем мире благодаря своим преимуществам. В первую очередь это высокая производительность, точность и качество реза. Технология применяется в различных отраслях промышленности, включая автомобильную, аэрокосмическую, медицинскую [1–6].

При лазерной резке происходит кратковременный локальный нагрев разделяемого материала до температур, превышающих температуру плавления. Расплавленный металл и образующаяся плазма выдуваются вспомогательным газом. При тепловом воздействии лазерного излучения в зоне реза могут проходить структурные превращения, приводящие к изменению механических свойств материала [1–3]. В связи с тем, что разные слои металла нагреваются до различных температур, зона лазерного воздействия (ЗЛВ) имеет слоистое строение (рис. 1). Выделяют три принципиально различных по природе фазовых превращений слоя: слой оплавленного металла (зону закалки из жидкой фазы); слой металла, претерпевшего структурные и фазовые изменения (зону закалки из твердой фазы); переходный слой к основе, остающейся без изменений (зону отпуска) [1].

Размеры отдельных участков и в целом зоны лазерного воздействия, а также степень упрочнения/разупрочнения материала в поверхностных слоях лазерного реза зависят от многих факторов: теплофизических свойств материала, параметров газовой струи, скорости резки, параметров лазерного излучения, толщины разделяемого материала и некоторых других. После лазерного раскрытия поверхности реза заготовки, как правило, подвергают слесарной обработке по удалению металла с измененной структурой и свойствами. Важной задачей является оценка целесообразности и масштабов проведения слесарных операций. Цель настоящей работы – провести анализ влияния технологических параметров лазерной резки на протяженность зоны лазерного воздействия.

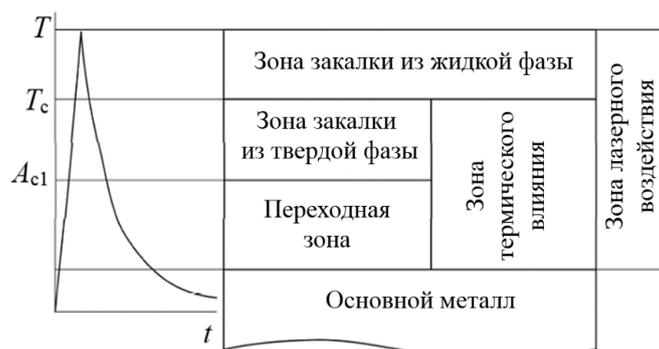


Рис. 1. Схема строения зоны лазерного воздействия для стали:
 T – температура нагрева; T_c – температура кристаллизации;
 A_{c1} – критическая точка; t – время

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Технология лазерной резки углеродистых, низколегированных сталей и некоторых сплавов цветных металлов наиболее изучена. Накоплен значительный опыт, разработаны технологические рекомендации, позволяющие с высокой производительностью и качеством выполнять раскрой. Для высоколегированных сталей и композиций на их основе вопросы о технологическом качестве процесса лазерной резки и о месте этой технологии в изготовлении изделий рассмотрены недостаточно полно [7–12]. С учетом факторов высокой стоимости и трудной обрабатываемости при изготовлении инструмента в качестве исследуемого материала в данной работе была выбрана быстрорежущая сталь марки Р6М5 ГОСТ 19265-73 (М2 по американскому марочнику). Она является ведущей сталью на рынке производства инструментов как в нашей стране, так и за рубежом, относится к вольфрамомолибденовым сталям оптимального состава.

Для расчетов температурных полей при лазерной резке быстрорежущей стали использовали методы исследования тепловых процессов при сварке, разработанные Н.Н. Рыкалиным в XX веке [13] и подтвержденные многолетним опытом сварочного производства при нагреве металла дугой и газовым пламенем. Необходимость распространения данных методов на исследование тепловых процессов при лазерной резке доказана в работах [14–16].

Параметры тепловых полей при лазерной резке быстрорежущей стали определяли по аналитическим выражениям, которые представляют собой решения дифференциальных уравнений теплопроводности в линейной постановке [13, 14]. Это значит, что коэффициенты теплофизических свойств считаются не зависящими от температуры. Уравнение, описывающее процесс распределения тепла вдоль тела при нагреве мощным быстро движущимся источником, имеет вид [14]

$$T_i = \frac{qe^{-\left(\frac{vR}{2a}\right)}}{2\pi\lambda R},$$

где $e = 2,718$ – число Эйлера; v – скорость лазерной резки, м/с; R – расстояние от рассматриваемой точки в поверхностном слое детали до источника тепла, м; λ – теплопроводность обрабатываемого материала, Вт/(м · °С); q – эффективная мощность лазерного теплового источника, Вт ($q = A \cdot P$, где P – мощность лазерного излучения, Вт; A – поглощательная способность ($A = 0,82$ для стали)); a –

температуропроводность обрабатываемого материала, $\text{м}^2/\text{с}$ ($a = \frac{\lambda}{c\rho}$, где c – удельная теплоемкость быстрорежущей стали, $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$; ρ – плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$).

Используя данное выше уравнение, выполняли расчеты распределения температуры в зоне лазерного воздействия при лазерной резке быстрорежущих сталей на различных режимах. Учитывая значения критических температур для стали Р6М5, определяли протяженность зоны лазерного воздействия в целом и размеры отдельных участков – зоны закалки и переходной зоны (зоны отпуска).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Процесс удаления расплава при лазерной резке сложен. Во время создания моделей необходимо учитывать законы газодинамики, гидродинамики, теплофизики, физики твердого тела, оптики [17–20]. Несмотря на широкое практическое использование, большинство исследователей считают, что технология лазерной резки далека от полного понимания. На текущий момент не существует единой модели, позволяющей учесть все особенности процесса. В связи с этим важное практическое значение имеет моделирование отдельных этапов технологического процесса, позволяющих оптимизировать режимы раскроя.

Согласно указанному выше уравнению, описывающему процесс распределения тепла вдоль тела при нагреве мощным быстродвижущимся источником, кроме свойств самого обрабатываемого материала, на протяженность зоны лазерного воздействия влияют мощность лазерного излучения и скорость резки.

В табл. 1 и на рис. 2 представлены результаты исследований влияния мощности лазерного излучения на формирование зоны лазерного воздействия, в том числе на протяженность отдельных участков. При расчетах скорость резки была постоянной и равнялась 0,043 м/с.

Таблица 1. Результаты расчетов протяженности ЗЛВ при постоянной v и переменной P

P , Вт	ЗЛВ, мкм	Зона закалки, мкм	Переходная зона, мкм
1 000	436	139	296
2 000	474	151	323
3 000	481	154	327
4 000	484	153	331
5 000	492	161	331

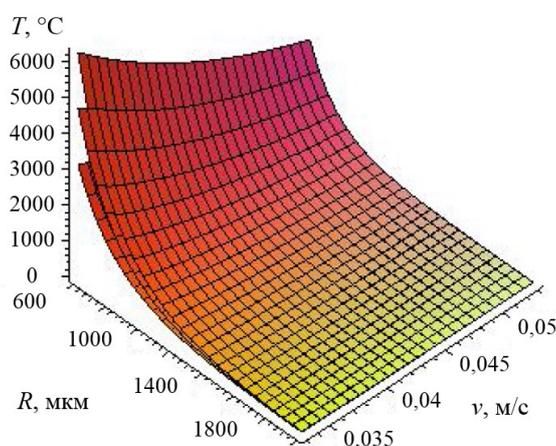


Рис. 2. Распределение температуры в ЗЛВ при лазерной резке стали с мощностью излучения 2 000 Вт (нижний график); 3 000 Вт (средний); 4 000 Вт (верхний)

В схеме расчетов источник тепла располагался в центре реза. Если разделение материала осуществляется, то формируется рез некоторой ширины. Поэтому R (расстояние от рассматриваемой точки в поверхностном слое заготовки) не может быть равно нулю и принимает значение, равное половине ширины реза (если проводится исследование поверхности реза) или больше (в случаях расчетов температуры в ЗЛВ или основном металле). Размер зоны закалки включает в себя как зону оплавления (зону закалки из жидкой фазы), так и зону закалки из твердой фазы. Поскольку в сталях процессы плавления и кристаллизации происходят в интервале температур, то определить, с какой температуры начинается формирование оплавленной зоны, затруднительно. Поэтому при установлении размеров началом зоны закалки считали кромку реза, а окончанием – расстояние, при котором в стали была температура нагрева $815\text{ }^{\circ}\text{C}$, соответствующая значению критической точки A_{c1} . При нагреве до этой температуры в стали данной марки образуется аустенит (γ – железо).

Протяженность зоны отпуска соответствовала участку, нагретому в интервале температур $815\text{...}200\text{ }^{\circ}\text{C}$. При верхних значениях нагрева в стали возможно разупрочнение за счет распада мартенсита, а также упрочнение за счет прохождения процессов дисперсионного твердения. При отпуске $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ в предварительно закаленных быстрорежущих сталях еще возможно образование карбидов цементитного типа, а следовательно, некоторое повышение твердости.

Анализ полученных данных показал, что даже кратное увеличение мощности излучения повышает протяженность зоны лазерного воздействия незначительно. Это связано с тем, что при большей мощности лазерного излучения возрастает температура расплавленного металла и плазмы, которые выдуваются вспомогательным газом из зоны реза и не успевают заметно увеличить протяженность зоны лазерного воздействия.

Скорость лазерной резки оказывает гораздо большее влияние на размер зоны лазерного воздействия (табл. 2 и рис. 3). В табл. 2 представлены результаты расчетов при постоянной мощности лазерного излучения $3\ 000\text{ Вт}$ и переменной скорости резки.

Технологию лазерной резки можно рассматривать не только как разделительную, но и как одновременно упрочняющую обработку при изготовлении некоторых инструментов из быстрорежущей стали. Например, в работе [11] дана рекомендация использовать лазерную резку при изготовлении малоразмерного инструмента. Удаление припусков наплавленной быстрорежущей стали с помощью лазерной резки позволяет существенно сократить технологический цикл изготовления биметаллического инструмента [10].

Таблица 2. Результаты расчетов протяженности ЗЛВ при переменной v и постоянной P

v , м/с	ЗЛВ, мкм	Зона закалки, мкм	Переходная зона, мкм
0,05	424	141	282
0,04	525	170	354
0,03	669	223	446
0,02	969	307	662
0,01	1 838	577	1 260

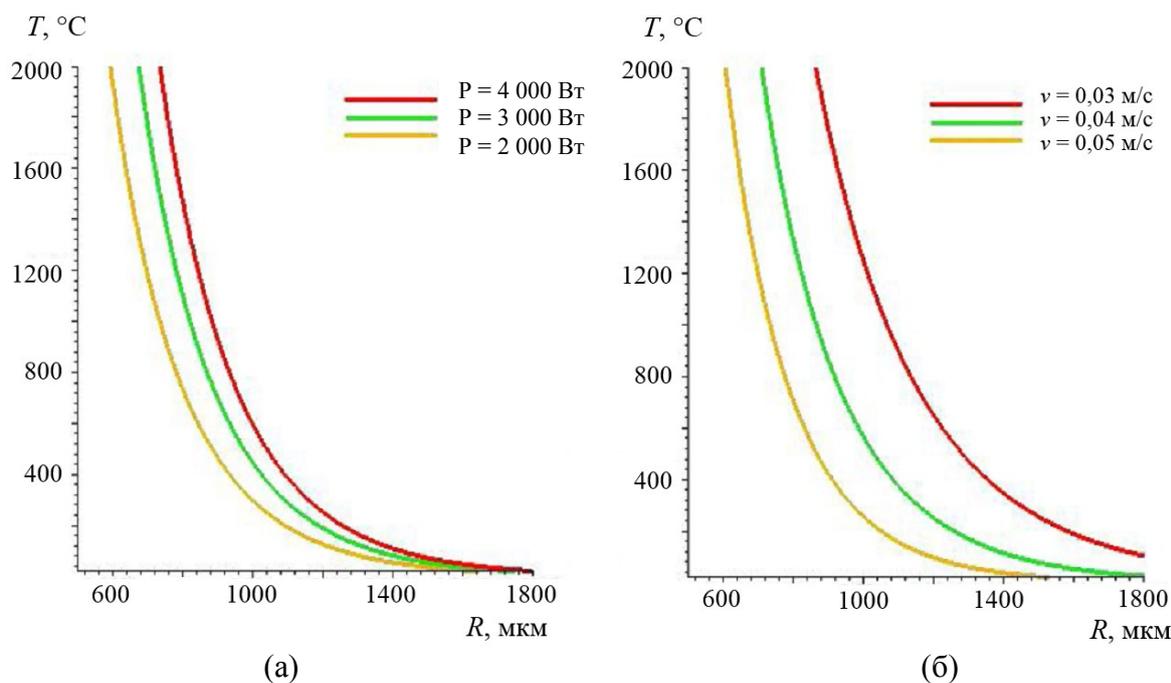


Рис. 3. Изменение температуры в зоне лазерного воздействия: переменная мощность излучения (а); скорость резки (б)

Отмечается ряд положительных свойств материала в зоне лазерного воздействия. В быстрорежущей стали формируется зона закалки с повышенной микротвердостью до $10\,600 \pm 160$ МПа и износостойкостью [12]. В предварительно закаленной и отпущенной быстрорежущей стали при лазерной резке не успевает проходить распад мартенсита при нагреве в интервале температур $A_{c1} \dots 620$ °С, т.е. переходная зона, или зона отпуска, не выявляется. Кроме того, авторами работы [12] показано, что зона закалки из жидкой фазы имеет ячеистое строение. Первичные карбиды практически все растворяются в металлической матрице, следовательно, при эксплуатации исключается преждевременный выход из строя инструмента из-за выкрашивания крупных карбидов в режущей кромке. При лазерной резке отсутствуют зоны многократного нагрева, что способствует повышению однородности свойств по всей поверхности реза. Перечисленные положительные свойства, а также результаты настоящей работы могут быть основой для пересмотра существующих технологий производства инструментов и разработки новых с использованием лазерной резки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненные расчеты показали, что размер закаленного слоя в зоне лазерного воздействия при лазерной резке быстрорежущей стали изменяется незначительно с увеличением мощности лазерного излучения. Глубина упрочненного слоя в большей степени зависит от скорости резки. Разработанные Н.Н. Рыкалиным методы исследования тепловых процессов при сварке вполне можно использовать для анализа зоны лазерного воздействия при лазерной резке.

Полученные результаты влияния технологических параметров лазерной резки на формирование зоны лазерного воздействия могут быть полезны при планировании и проведении последующих слесарных работ для конструкционных материалов, а также оценке глубины упрочненного слоя для инструментальных сталей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Мисюров А.И. Технологические процессы лазерной обработки. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2006. 664 с.
2. Riveiro A., Quintero F., Boutinguiza M., Del Val J., Comesaña R., Lusquiños F., Pou J. Laser Cutting: A review on the Influence of Assist Gas // *Materials*. 2019. V. 12. № 1. P. 157.
3. Khatak P. Laser Cutting Technique: A Literature Review // *Materials Today: Proceedings*. 2022. V. 56. P. 2484–2489.
4. Genna S., Menna E., Rubino G., Tagliaferri V. Experimental Investigation of Industrial Laser Cutting: The Effect of the Material Selection and the Process Parameters on the Kerf Quality // *Applied Sciences*. 2020. V. 10. № 14. P. 4956.
5. Kanyilmaz A. The Problematic Nature of Steel Hollow Section Joint Fabrication, and a Remedy Using Laser Cutting Technology: A Review of Research, Applications, Opportunities // *Engineering Structures*. 2019. V. 183. P. 1027–1048.
6. Parthiban A., Sathish T., Chandran S.S., Venkatesh R., Vijayan V. Optimization of CO₂ Laser Cutting Parameters on Austenite Stainless Steel Using Grey Relational Analysis // *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*. 2019. V. 10. № 1. P. 984–992.
7. 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»*. 2022. № 1 (13). С. 5–13.
8. Sobih M., Crouse P.L., Li L. Striation-free Fibre Laser Cutting of Mild Steel Sheets // *Applied Physics A*. 2008. V. 90. № 1. P. 171–174.
9. Wee L.M., Li L. An Analytical Model for Striation Formation in Laser Cutting // *Applied Surface Science*. 2005. V. 247. № 1–4. P. 277–284.
10. Афанасьева Л.Е., Барабонова И.А., Раткевич Г.В., Новоселова М.В., Гречишкин Р.М. Микроморфология поверхности и абразивная износостойкость инструментальной стали после газолазерной резки // *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*. 2016. № 12. С. 46–53.
11. Afanasieva L., Bolotov A., Abu-Abed F. High-Speed Steel Technology Substitution in Mining Machinery – an Experimental Study // *Acta Monstaniatica Slovaca*. 2024. V. 29 (1). P. 50–61.
12. Афанасьева Л.Е., Измайлов В.В., Новоселова М.В. Микротопография и микроструктура поверхности быстрорежущей стали после газолазерной резки // *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*. 2021. № 5. С. 68–75.
13. Рыкалин Н.Н. Расчеты тепловых процессов при сварке. М.: Машгиз. 1951. 296 с.
14. Безъязычный В.Ф., Семенов А.А. Расчетное определение температуры в поверхностном слое детали при лазерной резке // *Упрочняющие технологии и покрытия*. 2013. № 7. С. 35–40.
15. Зоренко Д.А., Барчуков Д.А., Афанасьева Л.Е. Моделирование температурных полей при лазерном раскрое стального проката // *Металлообработка*. 2021. № 2 (122). С. 26–31.
16. Tani G., Tomesani L., Campana G., Fortunato A. Quality factors assessed by analytical modelling in laser cutting // *Thin Solid Films*. 2004. V. 453. P. 486–491.

17. Ковалев О.Б., Оришич А.М., Петров А.П., Фомин В.М., Юдин П.В., Малов А.Н., Ермолаев Г.В. Моделирование фронта плавления и разрушения пленки расплава при газолазерной резке металлов // *Прикладная механика и техническая физика*. 2004. Т. 45. № 1. С. 162–172.

18. Пугачева Н.Б., Смирнов С.В., Ермолаев Г.В., Ковалев О.Б., Оришич А.М. Микроструктура поверхности и особенности моделирования физико-химических процессов при кислородной лазерной резке конструкционных сталей // *Физика и химия обработки материалов*. 2010. № 1. С. 15–22.

19. Зайцев А.В., Ковалев О.Б., Оришич А.М., Фомин В.М., Шулятьев В.Б. Газодинамика лазерной резки толстых металлических пластин непрерывным СО₂-лазером // *Вычислительные технологии*. 2006. Т. 11. № S1. С. 74–83.

20. Nabavi S.F., Farshidianfar A., Dalir H. An Applicable Review on Recent Laser Beam Cutting Process Characteristics Modeling: Geometrical, Metallurgical, Mechanical, and Defect // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2024. V. 130. № 5. P. 2159–2217.

Для цитирования: 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.

INFLUENCE OF TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF LASER CUTTING ON THE SIZE OF THE LASER IMPACT ZONE

D.A. BARCHUKOV, Cand. Sc., I.A. SMOLYAKOVA, Cand. Sc.,
L.E. AFANASIEVA, Cand. Sc.

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

It is noted in the article that based on the use of methods of research of thermal processes during welding, the laser impact zone formed during laser cutting of high-speed steel has been analyzed. It was shown that the size of the hardened layer is greatly affected by the laser cutting speed. On the contrary, changing the laser radiation power does not lead to a significant change in the size of the laser impact zone. The results of the work performed can be useful in developing new methods for manufacturing and hardening tools from high-speed steel.

Keywords: high-speed steel, laser cutting, technological parameters, laser impact zone.

Поступила в редакцию/received: 30.08.2024; после рецензирования/revised: 09.09.2024;
принята/accepted: 20.09.2024

НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ И ГОРНЫЕ НАУКИ

УДК 622.331.002.5

ФОРМЫ СЕЧЕНИЙ КУСКОВОГО ТОРФА И ЕГО ПРОЧНОСТЬ НА ИЗГИБ

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., 2024

В статье указано, что Тверским государственным техническим университетом разработана, запатентована и создана конструкция механического стенда, оснащенного системой цифрового тензометрирования и способного развивать и фиксировать разрушающую нагрузку для испытания на прочность образцов формованной торфяной продукции. Отмечено, что его планомерное использование с целью корректировки и рационализации режимов работы машин для добычи и производства кускового торфа позволит оперативно достигать стабильного качества торфа, однако методика применения данного стенда была сформирована ранее лишь для образцов кусков круглого и прямоугольного сечения. Приведены сведения, разработанные материалы и методика, позволяющие использовать созданный стенд для всех основных форм поперечных сечений кускового торфа, получаемых как в полевых, так и в заводских (стационарных) условиях.

Ключевые слова: кусковой торф, прочность на изгиб, форма поперечного сечения куска, изгибающий момент, момент сопротивления сечения, момент инерции, разрушающая нагрузка.

DOI: 10.46573/2658-5030-2024-4-29-36

ВВЕДЕНИЕ

Добыча в полевых и производство в стационарных условиях кускового торфа (как местного топлива) становится все более актуальной и вполне осуществимой задачей, решение которой может внести значительный вклад в общее направление обеспечения энергетической безопасности населения не только России, но и зарубежных стран [1, 2]. И если ранее были широко распространены лишь куски круглой формы, высотные, омегаобразные и арочные [3], получаемые методами стилки и фрезформовочным с применением соответствующих машин и оборудования, то сейчас количество мундштуков, обеспечивающих различные формы кускового торфа, с опытом производства его и в заводских (стационарных) условиях значительно выросло.

Вместе с тем для оперативного контроля качества [4] и своевременного внесения изменений в режимы работы машин и механизмов с целью исключения потерь [5] необходимо производить оценку прочностных свойств получаемой продукции.

Известные способы оценки относительной механической прочности кускового торфа по крошимости во вращающемся барабане и испытание путем определения давления жидкости, при котором происходит разрушение куска на гидравлическом прессе [3, 6, 7], являются косвенными, недостаточно точными и требующими весьма громоздкого оборудования. Поскольку большинство операций по добыче кускового

торфа после его формования (ворочки, валкования, переукладки валков, уборки) связано с изгибными деформациями куска, испытания на изгиб являются более информативными. В этих целях в ТвГТУ разработана, запатентована и создана конструкция механического стенда для испытания образцов кускового торфа на изгибную прочность. Проведена серия экспериментов по оценке энергоемкости формования торфа [8, 9] и изгибной прочности кусков круглого сечения [10, 11]. Разработана также и методика по оценке прочности на изгиб образцов круглого и прямоугольного сечения. Более того, поскольку в процессе экспериментов выявлена недостаточность предела измерения цифровым тензометрическим оборудованием максимальной (разрушающей) нагрузки (1 кН), создаваемой стендом, разработана также методика по расширению границ измерения нагрузки до 1,5 кН [12]. Однако все это касалось ранее только испытания образцов кускового торфа круглой и прямоугольной форм. Таким образом, цель данной статьи – разработка с помощью созданного стенда универсальной методики оценки прочности кускового торфа на изгиб, распространяемой на все основные существующие виды форм поперечных сечений куска.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Разработанная, запатентованная и созданная конструкция стенда для испытания образцов формованной торфяной продукции на прочность с ручным приводом (рис. 1) подробно описана в работах [10, 11].



Рис. 1. Стенд для испытания на изгибную прочность формованного торфа

Конструкция механического привода с многоступенчатым зубчатым зацеплением и коэффициентом усиления до 500 позволяет обеспечить плавное создание разрушающей нагрузки до 5 кН и провести испытание образцов длиной от 75 до 300 мм, а шириной и высотой от 1 до 130 мм. Исполнение поверхности базирующих установочных опор и конического наконечника в виде поверхностей с

радиусом постоянной кривизны снижает риск скалывания и развития трещин, а следовательно, повышает качество получаемых результатов.

Стенд создает разрушающую нагрузку (рис. 2).

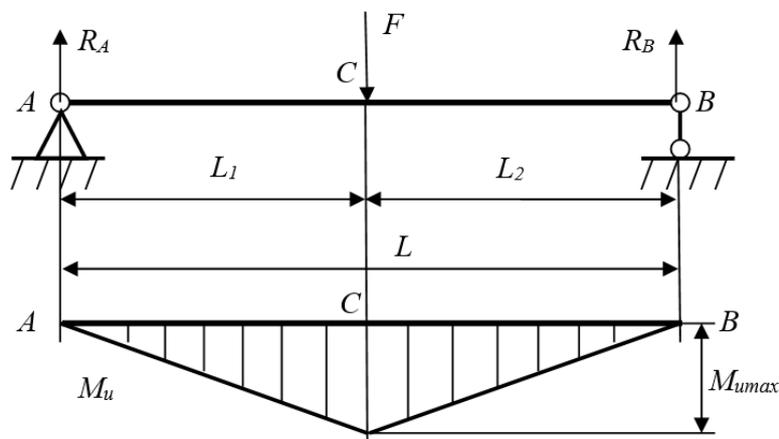


Рис. 2. Силовая схема создания разрушающей нагрузки и эпюра изгибающих моментов

Приложенная в центре испытываемого на изгиб образца нагрузка F (Н) вызывает равные реакции установочных опор при условии, что плечи $L_1 = L_2$ (м):

$$R_A = R_B = \frac{1}{2} F . \quad (1)$$

Изгибающий момент (Н·м), действующий по всей длине L образца, имеет максимальное значение в точке C (точке приложения нагрузки) и определяется по формуле

$$M_{и\ max} = R_A \frac{L}{2} = \frac{1}{2} F \frac{L}{2} = 0,25FL . \quad (2)$$

Прочность образца на изгиб (Па) в наиболее нагруженной точке может быть определена как отношение максимального изгибающего момента, действующего в сечении, к моменту сопротивления образца изгибу W_x (м^3):

$$\sigma_{и} = \frac{M_{и\ max}}{W_x} . \quad (3)$$

Зная, что момент сопротивления круглого образца определяется по зависимости

$$W_{x\ \text{кр}} = \frac{\pi D^3}{32} , \quad (4)$$

где D – наружный диаметр образца (м), а момент сопротивления прямоугольного образца – по зависимости [13]

$$W_{x\ \text{пр}} = \frac{bh^2}{6} , \quad (5)$$

где b и h – ширина и высота сечения образца (м) соответственно, можно получить формулы для вычисления изгибающих напряжений $\sigma_{и\ \text{кр}}$ и $\sigma_{и\ \text{пр}}$ для круглых и прямоугольных образцов кускового торфа с учетом уравнений (2) и (3) соответственно:

$$\sigma_{\text{и кр}} = \frac{8FL}{\pi D^3}; \quad (6)$$

$$\sigma_{\text{и пр}} = \frac{1,5FL}{bh^2} [10, 11]. \quad (7)$$

В формулах (6) и (7) при испытании образцов на изгиб учитываются расстояние между установочными опорами L и параметры сечения кускового торфа или брикета.

Помимо круглого и прямоугольного весьма распространенным является трапецеидальное сечение (так называемые «торфяные кирпичи»), которое часто применяется при выстилке на поля сушки кускового торфа стилочной машиной. При испытании на стенде малое основание a трапеции высотой h может располагаться как снизу, так и сверху. Естественно, при условии создания нагрузки стендом «сверху вниз» на верхнее основание трапеция с большим основанием b , расположенным снизу, имеет больший момент сопротивления, чем трапеция с основанием a , расположенным снизу. Моменты сопротивления таких трапеций определяются по формулам [14]:

для случая, когда большое основание располагается сверху:

$$W_{x \text{ тр1}} = \frac{h^2(a^2+4ab+b^2)}{12(a+2b)}, \quad (8)$$

случая, когда большое основание располагается снизу:

$$W_{x \text{ тр2}} = \frac{h^2(a^2+4ab+b^2)}{12(2a+b)}. \quad (9)$$

Соответственно, при подстановке уравнений (2), (8) и (9) в выражение (3) получаются формулы для определения прочности трапецеидальных кусков на изгиб:

$$\sigma_{\text{и тр1}} = \frac{3FL(a+2b)}{h^2(a^2+4ab+b^2)}; \quad (10)$$

$$\sigma_{\text{и тр2}} = \frac{3FL(2a+b)}{h^2(a^2+4ab+b^2)}. \quad (11)$$

Следующей (пока еще не широко распространенной, однако весьма перспективной) является трубчатая форма куска. В конце 80-х годов XX столетия Всесоюзным научно-исследовательским институтом торфяной промышленности был разработан, создан и испытан проект машины для добычи, формования и выстилки кускового торфа трубчатой формы [15]. Данная конструкция не дошла до стадии серийного изготовления из-за известных событий, связанных с рыночной экономикой, хотя именно для них и планировалась. И действительно, суммарная площадь испарения влаги при сушке куска трубчатой формы значительно больше, чем у круглого куска, а следовательно, и процесс полевой сушки идет быстрее, особенно при наличии ветра. Кроме того, разжечь кусок торфа с отверстием внутри проще, чем обычный цилиндрический, а горение в топке котла происходит в более стабильных условиях. На основе данных бесспорных преимуществ продолжились исследования по обоснованию трубчатой формы куска в последующих работах [16–19].

Момент сопротивления куска трубчатой формы (в поперечном сечении – кольца с наружным диаметром D и внутренним диаметром d) определяется по формуле [14]

$$W_{x \text{ труб}} = \frac{\pi D^3}{32} \left[1 - \left(\frac{d}{D} \right)^4 \right]. \quad (12)$$

При подстановке уравнений (2) и (12) в выражение (3) получается формула для определения прочности трубчатых кусков на изгиб:

$$\sigma_{\text{и труб}} = \frac{8FL}{\pi D^3 \left[1 - \left(\frac{d}{D} \right)^4 \right]}. \quad (13)$$

Наконец, широко распространенная форма поперечного сечения, особенно для кусков, получаемых в заводских (стационарных) условиях, – квадратно-пустотелая, часто называемая *Pini Kay* [20]. От формы *Pini Kay* квадратно-пустотелая форма отличается тем, что не имеет фасок на четырех наружных углах (в сечении брикетов *Pini Kay*, наиболее часто изготавливаемых из древесных опилок, лежит восьмиугольник). Однако это отличие незначительно, а для прессования торфа в качестве наружного мундштука используется, как правило, квадратная профильная труба. Поскольку в справочной литературе отсутствует готовая формула, позволяющая определить момент сопротивления квадратно-пустотелого сечения, выведем ее. Так, известно, что момент сопротивления относительно центральной оси равен отношению суммарного момента инерции фигуры I_x к расстоянию от оси до наиболее удаленной точки [13]. Момент инерции (m^4) квадрата со стороной a [21]

$$I_{x \text{ кв}} = \frac{a^4}{12}. \quad (14)$$

Момент инерции круга диаметром d [21]

$$I_{x \text{ кр}} = \frac{\pi d^4}{64}. \quad (15)$$

Тогда суммарный момент инерции квадратно-пустотелой фигуры (с учетом, что квадрат полнотелый, а круг образует пустоту):

$$I_x = I_{x \text{ кв}} - I_{x \text{ кр}} = \frac{a^4}{12} - \frac{\pi d^4}{64} = \frac{16a^4 - 3\pi d^4}{192}. \quad (16)$$

Поскольку наибольшее расстояние от оси до самой удаленной точки в квадрате $\frac{a}{2}$, то, согласно определению, момент сопротивления квадратно-пустотелой фигуры

$$W_{x \text{ квп}} = \frac{2I_x}{a} = \frac{2(16a^4 - 3\pi d^4)}{192a} = \frac{16a^4 - 3\pi d^4}{96a}. \quad (17)$$

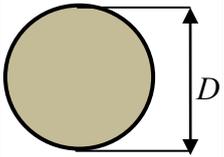
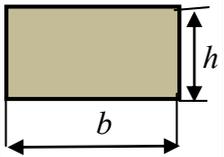
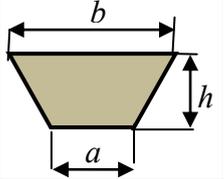
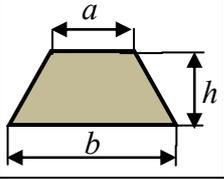
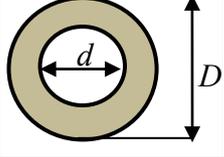
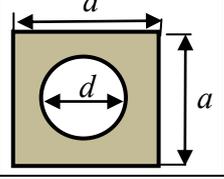
При подстановке уравнений (2) и (17) в выражение (3) получается формула для определения прочности квадратно-пустотелых кусков на изгиб:

$$\sigma_{\text{и квп}} = \frac{24FL}{16a^4 - 3\pi d^4}. \quad (18)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для удобства использования и анализа результаты расчетов сведены в таблицу.

Расчетные зависимости моментов сопротивления W_x и прочности на изгиб $\sigma_{и}$ для торфяных кусков различной формы поперечного сечения*

№ п/п	Наименование формы поперечного сечения куска	Форма поперечного сечения куска	Расчетная зависимость момента сопротивления сечения W_x , м ³	Расчетная зависимость прочности на изгиб $\sigma_{и}$, Па
1	Круглая		$W_{x \text{ кр}} = \frac{\pi D^3}{32}$	$\sigma_{и \text{ кр}} = \frac{8FL}{\pi D^3}$
2	Прямоугольная		$W_{x \text{ пр}} = \frac{bh^2}{6}$	$\sigma_{и \text{ пр}} = \frac{1,5FL}{bh^2}$
3	Трапецидальная 1		$W_{x \text{ тр1}} = \frac{h^2(a^2 + 4ab + b^2)}{12(a + 2b)}$	$\sigma_{и \text{ тр1}} = \frac{3FL(a + 2b)}{h^2(a^2 + 4ab + b^2)}$
4	Трапецидальная 2		$W_{x \text{ тр2}} = \frac{h^2(a^2 + 4ab + b^2)}{12(2a + b)}$	$\sigma_{и \text{ тр2}} = \frac{3FL(2a + b)}{h^2(a^2 + 4ab + b^2)}$
5	Трубчатая (кольцевая)		$W_{x \text{ труб}} = \frac{\pi D^3}{32} \left[1 - \left(\frac{d}{D} \right)^4 \right]$	$\sigma_{и \text{ труб}} = \frac{8FL}{\pi D^3 \left[1 - \left(\frac{d}{D} \right)^4 \right]}$
6	Квадратно-пустотелая		$W_{x \text{ квп}} = \frac{16a^4 - 3\pi d^4}{96a}$	$\sigma_{и \text{ квп}} = \frac{24FLa}{16a^4 - 3\pi d^4}$

*Примечание. Предполагается, что разрушающая нагрузка F приложена к изображенным в таблице формам поперечного сечения куска сверху вниз.

Для испытания образцов формованной торфяной продукции на прочность с помощью стенда [10, 11] следует измерить геометрические характеристики сечения испытываемого образца; выставить необходимое расстояние L между установочными опорами; включить цифровой динамометр, дав ему прогреться в течение 10 мин, обнулить показания и перевести в режим фиксации максимального значения разрушающей нагрузки; поместить на установочные опоры стенда испытываемый образец; штурвалом подвести конический наконечник стенда к образцу; медленно вращая штурвал, довести нагрузку до максимального значения, при котором образец

разрушается; занести в журнал наблюдений зафиксированное на цифровом динамометре значение максимальной нагрузки F ; рассчитать по формулам (4), (5), (8), (9), (12) или (17) момент сопротивления сечения образца W_x ; определить по формулам (6), (7), (10), (11), (13) или (18) прочность образца на изгиб $\sigma_{и}$; эксперимент повторить 5...6 раз на однотипных образцах для достижения корректности результатов; определить среднее значение прочности на изгиб по 5...6 измерениям. Полученную в ходе эксперимента среднюю прочность на изгиб необходимо сравнить с допускаемой прочностью, которой можно считать 4...6 МПа при содержании влаги 20...30 % [3].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате работы существенно дополнена ранее опубликованная методика по оценке прочности на изгиб формованной торфяной продукции [10, 11], которая включает все имеющиеся на сегодняшний день формы поперечных сечений кускового торфа и позволяет использовать экспресс-метод для оценки прочности образцов на изгиб с помощью разработанного стенда, а также оперативно вносить коррективы в режимы настройки технологического производственного оборудования.

ЛИТЕРАТУРА

1. 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.
2. Панов В.В., Мисников О.С., Купорова А.В. Проблемы и перспективы развития торфяного производства в Российской Федерации // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2017. № 5. С. 105–117.
3. Справочник по торфу / И.Ф. Ларгин [и др.]. М.: Недра. 1982. 760 с.
4. Терентьев А.А., Суворов В.И. Структура и свойства формованной торфяной продукции. Тверь: Созвездие. 2004. 136 с.
5. Kremcheev E.A., Kremcheeva D.A. Technological Approaches to Reducing the Loss of Peat Raw Materials in Fields with Hydrological Regime // *Indian Journal of Science and Technology*. 2016. V. 9. № 12. P. 89525.
6. Булышко М.Г., Иванов В.Н., Сарматов М.И. Брикетирование торфа. М.: Госэнергоиздат. 1962. 303 с.
7. Семенский Е.П. Технический анализ торфа. М.: Недра. 1966. 232 с.
8. Яблонев А.Л., Гусева А.М. Определение энергоемкости процесса формования кускового торфа // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2019. № 1. С. 36–45.
9. Яблонев А.Л., Гусева А.М. Экспериментальное обоснование рациональных режимов производства кускового торфа // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2019. № 2. С. 163–171.
10. Яблонев А.Л., Гусева А.М. Анализ параметров и режимов работы формующего агрегата машин для добычи кускового торфа с позиции обеспечения качества получаемого продукта // *Горный журнал*. 2022. № 5. С. 52–57.
11. Яблонев А.Л., Гусева А.М. Определение прочности на изгиб формованной торфяной продукции // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2019. № 3 (3). С. 47–55.
12. Yablonev A., Guseva A. Method of Expanding Measurement Limits of Digital Dynamometer in Testing Strength of Moulded Peat Products // *E3S Web of Conferences. EDP Sciences*. 2020. V. 174. P. 01035.
13. Степин П.А. Сопротивление материалов. М.: Высшая школа. 1988. 367 с.

14. Таблица. Изгиб. Осевые моменты инерции сечений (статические моменты сечений), осевые сопротивления и радиусы инерции плоских фигур. URL: <https://dpva.xyz/Guide/GuideMaterials/MaterialsResistant/MomentsOfInertia/> (дата обращения: 14.08.2024).

15. Селеннов В.Г., Петров Ю.О., Юрков В.М. Нереализованные разработки института // *Торф и Бизнес*. 2006. № 3 (5). С. 23–27.

16. Федоров А.С., Казаков Ю.В., Фадеев Д.В. Параметры мундштука шнекового пресса с учетом требований к торфяной формованной продукции // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2020. № S9. С. 3–15.

17. Федоров А.С., Михайлов А.В., Гарифуллин Д.Р. Механическая переработка торфяного сырья при формовании в составном мундштуке шнекового пресса // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2020. № S44. С. 3–13.

18. Михайлов А.В., Федоров А.С. Анализ условий полевого производства окускованной торфяной продукции. *Машины, агрегаты и процессы. Проектирование, создание и модернизация: Материалы междуна. научно-практ. конф.* СПб.: СПбФ НИЦ МС. 2018. № 1. С. 146–147.

19. Михайлов А.В., Федоров А.С. Направления интенсификации сушки торфяной окускованной продукции в полевых условиях // *Автоматизированное проектирование в машиностроении*. 2018. № 6. С. 6–8.

20. Ракитова О. Большое дело для малого бизнеса // *The Bioenergy International (Международная биоэнергетика)*. 2011. № 1 (18). С. 14–15.

21. Беликов Г.И. Геометрические характеристики поперечных сечений стержней. Волгоград: ВолгГАСУ. 2015. 57 с.

Для цитирования: Яблонев А.Л. Формы сечений кускового торфа и его прочность на изгиб // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2024. № 4 (24). С. 29–36.

SHAPE OF SECTIONS OF SOD PEAT AND ITS FLEXURAL STRENGTH

A.L. YABLONEV, Dr. Sc.

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

The article states that the Tver State Technical University has developed, patented and created the design of a mechanical stand equipped with a digital strain gauging system capable of developing and fixing the breaking load for strength testing of samples of molded peat products. It is noted that its systematic use in order to adjust and rationalize the modes of operation of machines for extraction and production of lump peat will promptly achieve a stable quality of peat, but the methodology of application of this stand was formed earlier only for samples of lumps of round and rectangular cross-section. The information, developed materials and methodology allowing to use the created stand for all main forms of lump peat cross-sections obtained both in the field and in factory (stationary) conditions are given.

Keywords: sod peat, bending strength, cross-sectional shape of the piece, bending moment, sectional moment of resistance, moment of inertia, breaking load.

Поступила в редакцию/received: 28.08.2024; после рецензирования/revised: 10.09.2024;
принята/accepted: 17.09.2024

ПУТИ УЛУЧШЕНИЯ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОИЗВОДСТВА КУСКОВОГО ТОРФА

О.В. ПУХОВА, канд. техн. наук, К.Л. ШАХМАТОВ, канд. техн. наук,
К.Ю. ЖЕНИХОВ, ст. препод.

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

© Пухова О.В., Шахматов К.Л., Женихов К.Ю., 2024

В статье рассмотрены вопросы уменьшения энергетических капитальных затрат при полевом производстве кускового торфа. Отмечено, что послойно-щелевым способом на основе метода механизированной экструзии сформованы цилиндрические куски непосредственно на технологических площадках добычи с последующими операциями сушки и уборки. В процессе производства кусков фрезформовочным способом установлено, что добыча является весьма энергозатратной технологией, поэтому появился вопрос о снижении расходов на его производство. Указано, что при фрезформовании существенные нагрузки воздействуют на ножи рабочего органа фрезерирующего агрегата при экструзии и вызывают их деформацию, затем и разрушение, вследствие чего увеличиваются затраты мощности на формование, а тем самым снижаются производительность и надежность агрегата. Рассчитаны удельная работа и необходимые мощности на фрезерование и формование, определена минимальная мощность трактора, требуемая для выполнения операции фрезформования. Обозначено, что для улучшения технико-экономических характеристик торфяного участка по добыче кускового торфа был использован показатель комплексной оценки, позволивший выбрать маломощное оборудование, тем самым сократить эксплуатационные и капитальные затраты и повысить рентабельность и надежность производства.

Ключевые слова: кусковой торф, торфяная залежь, добыча, энергозатраты, фрезформование, рентабельность.

DOI: 10.46573/2658-5030-2024-4-37-45

ВВЕДЕНИЕ

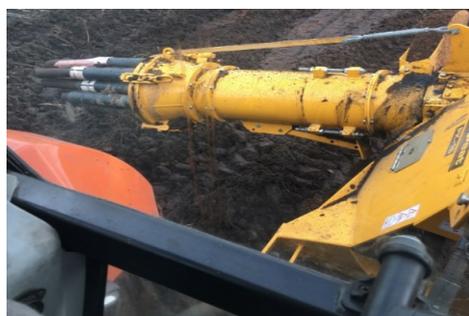
В начале XX столетия торф являлся наиболее значимым полезным ископаемым в стране. Его активно изучали, добывали, а также разрабатывали технологии обработки [1–3]. С постоянным развитием технологий росла потребность в большем количестве энергии. Главным ее источником [4–6] стал уголь, затем использовали газ, а через некоторое время атомная энергетика начала играть значимую роль в данной сфере. В настоящее время производство топливного торфа в России [1, 7–12] находится в стагнации, поскольку в свое время его вытеснила добыча угля, нефти и газа для использования в той же среде. Несмотря на дополнительные недостатки торфяных организаций (относительно низкие заработные платы, большие капитальные затраты и малое количество подготовленных кадров), эта сфера все еще остается в списке перспективных и развивающихся.

Кусковой торф (рис. 1а) – твердое энергетическое и коммунально-бытовое топливо. Если в энергетической промышленности торф (в сравнении с более эффективными аналогами) почти изжил себя, то в сферах агрономии, сельского

хозяйства и строительства он имеет твердую позицию либо положительную тенденцию роста. Так, торф незаменим в виде пролонгированного удобрения и улучшителя почвы из-за возможности контролирования показателя кислотности почвы и исключения вредных бактерий и растений, а также необходим в качестве подстилки для птиц и животных. В строительстве торф является отличным как тепло-, так и звукоизолирующим материалом. Его получают путем выдавливания пластичной торфяной массы через формующие мундштуки (рис. 1б) с последующей сушкой в полевых условиях до уборочной влажности. При сгорании кусковой торф выделяет порядка 11 МДж/кг энергии. Этого количества теплоты больше, чем у дров, но меньше, чем у торфяного брикета. Кусковой торф, если сравнить с теплоотдачей, сопоставим с низкокалорийными углями, но не имеет их недостатков, таких как высокая зольность и наличие сернистых выделений. Вместе с тем он является достаточно экологичным видом местного топлива как при добыче, так и при использовании.



(а)



(б)

Рис. 1. Изображение кускового торфа на поле сушки (а);
формования торфяных кусков (б)

Торф в виде топлива не является основным источником энергии на масштабных котельных, но его использование на ТЭЦ [13–15] может быть установлено законодательством региона для исключения монополизации другого энергоносителя, (например, газа или угля), как это было сделано в Кировском регионе. Кроме того, торф используется на котельных в регионах, не имеющих возможности пользования другими средствами отопления из-за их недоступности или недостижимости.

В настоящей работе рассматривается возможность использования на операции фрезформования трактора с меньшим тяговым усилием для снижения энергоемкости [16–18].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Научно-исследовательская работа выполнялась на производственной площадке торфяного участка «Катка-3», который находится в Мурманской области, а точнее во впадине морской равнины без активного стока. Геологическое строение сложено породами архейского периода и четвертичными отложениями. По итогам геологической разведки и лабораторной экспертизы были установлены характеристики и качества полезного ископаемого (табл. 1).

Таблица. 1. Характеристики торфяного сырья

Наименование	Ед. изм.	Значение
Естественная влажность	%	88,4
Балансовые запасы при условной влажности 40 %	тыс. т	1 398,4
Средняя глубина залежи	м	2,1
Тип залежи	–	Низинный
Степень разложения	%	30
Зольность	%	3,5

Сезон добычи торфа, проходящий с конца мая по конец августа, характеризовался среднесуточной температурой воздуха +15 °С, относительной влажностью воздуха 70 % и среднемесячными осадками 48 мм. Технологические площадки для добычи кускового торфа имели стандартизированные размеры: длина карт нетто составляла 300 м, а ширина – 30 м. Формование кускового торфа (рис. 2) велось механизированной экструзией с сушкой сформованных кусков [19–21] непосредственно на полях добычи с последующими операциями сушки и уборки. Продолжительность сушки до кондиционной влажности составляла 230 ч с учетом выпадающих осадков в объеме более 10 кг/м².

В ходе формования извлекаемая из залежи торфяная масса измельчается, во-первых, за счет вращающейся дисковой фрезы, а во-вторых, в напорном шнеке, где также уплотняется. С помощью фрезформирующих механизмов организуется первый этап производства кускового торфа. На последующих этапах сформированные куски подвергаются сушке на полях добычи в естественной среде.



Рис. 2. Вид технологической площадки при формовании

Качество добытого и высушенного кускового торфа определялось по стандартной методике (табл. 2).

Таблица 2. Качество готовой продукции

Наименование	Единицы измерения	Значение
Плотность	кг/м ³	440
Прочность на изгиб	МПа	1,75...1,9
Низшая теплота сгорания при условной влажности:	МДж/кг (ккал/кг)	
40 %		11,67 (2 795)
35 %		13,32 (3 189)
20 %		16,38 (3 921)
Диаметр кусков в конце сушки	мм	55...60

Удельная работа на фрезерование $A_{\text{ф}}$ (кг/(м·с²)) залежи, согласно С.Г. Солопову, определялась как работа фрезы за один оборот к срезаемому объему V залежи. Удельную работу можно определить через крутящий момент на валу фрезы $M_{\text{кр}}$ (Н·м) и геометрические показатели:

$$A_{\text{ф}} = \frac{2 \pi M_{\text{кр}}}{z h_{\text{п.ф}} c B},$$

где z – число ножей в плоскости резания; $h_{\text{п.ф}}$ – глубина погружения фрезы, м; c – подача на нож, м; B – ширина диска фрезы (она же ширина ножа, м).

Подача на нож определялась по формуле

$$c = \frac{\pi D}{z \lambda},$$

где D – диаметр дисковой фрезы по концам ножей, м; λ – скоростной параметр, определяющий отношение окружной скорости точки на конце ножа фрезы $v_{\text{тр}}$. При рассмотрении движения одного отдельного ножа фрезы как перемещения точки на окружности скоростной параметр рассчитывался как

$$\lambda = \frac{\pi D n}{z v_{\text{тр}}},$$

где n – количество оборотов дисковой фрезы за секунду, с⁻¹.

Используя преобразование, определили крутящий момент дисковой фрезы $M_{\text{кр}} = m v_{\text{н}}^2$, где m – масса диска, кг; $v_{\text{н}}$ – окружная скорость ножа, м/с.

Используя вышеперечисленные формулы, удельную работу на фрезерование определили как

$$A_{\text{ф}} = \frac{2 \pi m n v_{\text{н}}^2}{h_{\text{п.ф}} B v_{\text{тр}}},$$

или

$$A_{\phi} = \frac{2 m \pi^3 n^3 D^2}{h_{п.ф} B v_{тр}}.$$

Мощность N_{ϕ} (Вт) трактора, необходимая при осуществлении фрезерования без учета сопротивления резания торфяной залежи, определялась для условий работы при загрузке с запасом мощности 30...40 % как $N_{\phi} = Q_{\phi} \cdot A_{\phi}$, где Q_{ϕ} – производительность фрезы, м³/с ($Q_{\phi} = \frac{\pi h D b n K_n}{K_p}$, где h – высота ножа, м; D – диаметр дисковой фрезы по концам ножей, м; b – ширина ножа, м; K_n и K_p – коэффициенты наполнения и разрыхления соответственно).

Основным органом, предназначенным для переработки торфа, является напорный шнек, диспергирующий и подающий торфомассу к экструдерам. Необходимая мощность для работы шнека (кВт):

$$N_{шн} = \frac{\sqrt{2\tau} \lambda_{п} Q_{шн}}{1\,000 (1-\varepsilon)\eta},$$

где τ – тангенциальное напряжение сдвигаемых слоев торфа, Н/м²; $\tau = \tau_0 + f \sigma$ (где τ_0 – тангенциальное напряжение сцепления, Н/м², возникающее при сдвиге слоев торфа в условиях нормального атмосферного давления σ , кН/м²; f – коэффициент трения); $\lambda_{п}$ – степень переработки; $Q_{шн}$ – производительность напорного шнека, м³/с; ε – коэффициент скольжения торфа по поверхности кожуха шнека; η – коэффициент полезного действия передачи от вала двигателя до шнека.

Производительность однозаходного шнека (м³/с) рассчитывалась следующим образом:

$$Q_{шн} = 0,2 \cdot 10^{-3} \cdot \varphi(1 - k^2) z \omega R^3,$$

где φ – коэффициент вращения торфа вместе со шнеком; k – отношение внутреннего радиуса шнека к наружному; z – число заходов шнека (для однозаходного шнека $z = 1$).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

При проведении научно-исследовательской работы на производственной площадке были использованы маломощные трактора вместе со стилочным оборудованием, необходимые для формирования кускового торфа с достаточными качественными показателями и работающие на предельных или запредельных оборотах двигателя. Кроме того, возможная круглосуточная работа агрегатов с организацией работ в две смены продолжительностью по двенадцать часов определенно негативно сказывается на сроке службы и ремонтпригодности техники. Поскольку добыча кускового торфа фрезформовочным способом является весьма энергозатратной технологией, сокращение расходов на процесс формирования позволило повысить эффективность производства кускового торфа.

На усилие, противостоящее сопротивлению рабочего агрегата, существенно влияли плотностные и прочностные характеристики торфа разрабатываемой залежи, а также древесные включения, прослойки суходола, глины либо нерастаявших ледяных глыб в условиях Крайнего Севера, находящихся под поверхностным слоем разрабатываемой залежи. При исследовании не учитывалось наличие камней в массиве

торфа, хотя попадание особо крупных в приемное отверстие шнека иногда может полностью блокировать подачу торфа.

Дисковая фреза фрезформовочной машины, работая на переуплотненной части суходола, вызывает серьезное сопротивление двигателя, что приводит к снижению как частоты вращения дисковой фрезы, так и оборотов коленчатого вала. Сравнительные расчеты минимальных мощностей были проведены для фрезформовочных машин финского (PK-1SL R12, PK-1SL C5), ирландского (HERBST) и отечественного (МТК-16) производства. Первые пользуются большим спросом в связи с высоким показателем «цена – качество», а российские – благодаря очень низкой стоимости.

В табл. 3 приведены расчеты минимальных требуемых мощностей для оборудования.

Таблица 3. Характеристики оборудования при производстве кускового торфа

Наименование оборудования	Производительность фрезы, м ³ /с	Удельная работа фрезерования, кДж/м ³	Мощность на фрезерование, кВт	Мощность на работу шнека, кВт	Общая мощность, кВт
PK-1SL R12	0,042	762,389	44,83	11,5	56,33
PL-1SL C5	0,042	762,839	44,83	10,5	55,33
HERBST	0,04	755,346	42,43	9,7	54,78
МТК-16	0,015	124,294	26,10	9,31	35,41

Анализ данных табл. 3 показывает, что самым энергозатратным оборудованием является финская фрезформовочная машина PK-1SL R12 (на 60 % больше в сравнении с российской МТК-16). Кроме того, необходимо учитывать, что данные расчеты велись для стоящего на месте трактора, т.е. к полученному значению N_{min} требуется добавить расход мощности на передвижение. В то же время этот недостаток полностью нивелируется производительностью фрезы, которая выше в 2,8 раза. Анализ позволяет сделать вывод о том, насколько сильно удельная работа фрезерования влияет на требуемую мощность трактора, а также дает возможность сравнить фрезформовочное оборудование только по параметрам, заданным в эксплуатационной документации.

Для комплексной оценки использовался коэффициент $K_{ко}$, определяющий отношение удельной работы дисковой фрезы к общей требуемой мощности:

$$K_{ко} = \frac{A_{\phi}}{N_{min}}.$$

Значения коэффициента комплексной оценки для фрезформовочных машин выше в 2,3 раза у финской модели PK-1SL R12 в сравнении с российской МТК-16. Преимущества финской машины PK-1SL R12 говорят о том, что ее можно использовать при выборе оборудования в ходе проектирования участка по производству кускового торфа.

Анализ технико-экономических показателей производства кускового торфа показал, что, основываясь на проведенных исследованиях, связанных с использованием тракторов малой мощности, можно снизить показатели: вложения в технику – на 16 %; амортизационные отчисления и отчисления на ремонт – в 1,4 раза; удельные расходы на добычу 1 т торфа – на 50 %. Это дало возможность увеличить рентабельность всей технологической схемы производства кускового торфа до 65 %.

Данный существенный показатель отражает эффективность вложения инвестиций в производство кускового торфа в качестве местного топлива в Мурманской области.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. В ходе формирования кускового торфа способом механизированной экструзии при попадании дисковой фрезы фрезформовочной машины на переуплотненную часть суходола, имеющего большие прочностные характеристики, двигатель агрегата испытывает серьезное сопротивление, снижается как частота вращения дисковой фрезы, так и обороты коленчатого вала.

2. Использование трактора с меньшим тяговым усилием для снижения энергоемкости операции фрезформования позволило уменьшить удельные расходы топлива на производство и, как следствие, капитальные затраты на добычу кускового торфа для котельных близко расположенных поселков, в которых отсутствует газоснабжение. С учетом этого для местного населения создают вакантные места.

Таким образом, использование тракторов с меньшим тяговым усилием при фрезформовании кускового торфа на производственных площадках участка способствует повышению экономических показателей предприятия, а также отражает привлекательность инвестирования в данную отрасль.

ЛИТЕРАТУРА

1. 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.

2. Мисников О.С., Копенкина Л.В. Возникновение торфяного дела в России // *Горный журнал*. 2020. № 2. С. 95–99.

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

4. Яблонев А.Л., Пухова О.В. Современные направления использования торфа // *Вестник Тверского государственного технического университета*. 2010. № 17. С. 104–107.

5. 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.

6. Мисников О.С. Тимофеев А.Е. О рациональном использовании энергетических и минеральных ресурсов торфяных месторождений // *Горный журнал*. 2008. № 11. С. 59–63.

7. Мисников О.С., Тимофеев А.Е., Михайлов А.А. Анализ технологий разработки торфяных месторождений в странах дальнего и ближнего зарубежья // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2011. № 9. С. 84–92.

8. Панов В.В., Мисников О.С. Тенденции развития торфяной отрасли России // *Горный журнал*. 2015. № 7. С. 108–112.

9. Алпеева Е.А., Гончаров М.С. Торфяная промышленность Российской Федерации. Проблемы и перспективы // *Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии*. 2021. № 3. С. 121–130.

10. Воскобойник М.П. Прогноз добычи торфа в условиях инновационного развития экономики России // *Горная промышленность*. 2015. № 4 (122). С. 22.

11. 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.

12. Нагорнов Д.О. Технологии добычи торфяного сырья в СЗФО // *Высшая школа*. 2015. № 9. С. 63–66.

13. Заровняев Б.Н., Попов В.Ф., Шубин Г.В., Будикина 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.

14. Ялтанец И.М., Штин С.М. Получение биотоплива и его сжигание с целью теплоснабжения жилищного и социального сектора небольших населенных пунктов с численностью населения 11–15 тысяч жителей // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2009. № S1. С. 95–113.

15. Пиксайкин В.К. Добыча торфа предприятиями местной топливной промышленности Мордовской АССР в 1940–1990-е гг. // *Экономическая история*. 2011. № 3 (14). С. 37–46.

16. Яблонев А.Л., Гусева А.М. Определение энергоемкости процесса формирования кускового торфа // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2019. № 1 (1) С. 36–45.

17. Яблонев А.Л., Гусева А.М. Экспериментальное обоснование рациональных режимов производства кускового торфа // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2019. № 2. С. 163–171.

18. Misnikov O., Yablonev A., Kuporova A. Theories of Peat Systems Structure Formation and Prospects for Their Practical Use in the Production of Molded Fuel // *AIP Conference Proceedings. AIP Publishing*. 2023. V. 2526. № 1. P. 040003.

19. Яблонев А.Л., Мисников О.С., Гусева А.М. Обоснование рациональных параметров и режимов работы перерабатывающего и формующего пресса машин для добычи кускового торфа // *Горный журнал*. 2021. № 8. С. 51–56.

20. Мисников О.С., Купорова А.В. Технологические основы добычи гидрофобно-модифицированного кускового торфа // *Горный журнал*. 2022. № 12. С. 34–39.

Для цитирования: Пухова О.В., Шахматов К.Л., Женихов К.Ю. Пути улучшения технико-экономических характеристик производства кускового торфа // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2024. № 4 (24). С. 37–45.

WAYS TO IMPROVE THE TECHNICAL AND ECONOMIC CHARACTERISTICS OF PRODUCTION OF LUMP PEAT

O.V. PUKHOVA, Cand. Sc., K.L. SHAKHMATOV, Cand. Sc.,
K.Yu. ZHENIKHOV, Senior Lecturer

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

The article considers the issues of reducing energy capital costs in the field production of lump peat. It is noted that the layer-by-layer slit method based on the method of mechanized extrusion molded cylindrical lumps directly at the technological sites of extraction with subsequent drying and harvesting operations. In the process of lumps production by milling-forming method it was found that the extraction is a very energy-

*Вестник Тверского государственного технического университета.
Серия «Технические науки». № 4 (24), 2024*

consuming technology, so the question of reducing the costs of its production appeared. It is indicated that during milling molding, substantial loads act on the knives of the working body of the milling unit during extrusion and cause their deformation and then destruction, as a result of which the power consumption for molding increases, and thus the productivity and reliability of the unit are reduced. Specific work and required power for milling and molding are calculated, as well as the minimum tractor power required to perform the operation of milling and molding is determined. It is stated that in order to improve the technical and economic characteristics of the lump peat peat extraction site, the complex evaluation indicator was used, which allowed to select low-power equipment, thereby reducing operating and capital costs and increasing the profitability and reliability of production.

Keywords: lumpy peat, peat deposit, extraction, energy consumption, milling, profitability.

Поступила в редакцию/received: 16.09.2024; после рецензирования/revised: 25.09.2024;
принята/accepted: 02.10.2024

УДК 622.232

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ РАЗРАБОТКИ ДЛЯ ДОРОЖНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА

Ю.Н. ПАВЛОВ, канд. техн. наук, А.В. КОНДРАТЬЕВ, д-р техн. наук,
С.М. КОЧКАНЯН, канд. техн. наук, Д.Г. МАСЛЕННИКОВ, канд. техн. наук

Тверской государственный технический университет
170026, Тверь, наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: pavlov237@yandex.ru

© Павлов Ю.Н., Кондратьев А.В., Кочкян С.М.,
Масленников Д.Г., 2024

Представлен обзор научных исследований и опытно-конструкторских работ, выполненных на кафедре строительных, дорожных машин и оборудования Тверского государственного технического университета для механизации дорожного строительства. Выбраны разработки, которые остаются перспективными и по которым продолжаются исследования. Отмечено, что для большинства из них проведена работа от постановки задачи до создания и испытания экспериментального образца, при этом в ходе данной работы появились новые идеи совершенствования технологий и конструкций. Приведены описания и некоторые результаты исследований или испытаний оборудования для нанесения дорожной разметки, срезки кустов и мелких деревьев в полосе отвода автомобильных дорог, проведения ямочного ремонта, приготовления сухой асфальтобетонной смеси и вибрационного уплотнения грунтов.

Ключевые слова: дорожная разметка, полоса отвода автомобильных дорог, срезка кустов и мелких деревьев, сухая асфальтобетонная смесь, ямочный ремонт, вибровозбудитель, грунтоуплотняющая машина.

DOI: 10.46573/2658-5030-2024-4-45-51

ВВЕДЕНИЕ

Кафедрой строительных, дорожных машин и оборудования (СДМО) выполнен значительный объем работ для решения прикладных и перспективных задач механизации дорожного строительства. Некоторые научные исследования и

обоснования новых конструкций машин были проведены еще в советское время, но при этом полученные результаты и предложения по внедрению новых технологий и конструкций дорожных машин актуальны и сегодня. Другая часть исследований относится к области изучения современных проблем дорожного строительства и разработке конструкций специализированных дорожных машин на перспективу. В данной статье приводится обзор ряда научных работ, выполненных для дорожного строительства. Цель публикации – ознакомить читателей с проведенными исследованиями, разработанными конструкциями машин и оборудования и предложенными технологиями.

ТЕМЫ РАБОТ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Одной из первых работ, выполненных по заданию дорожно-строительной организации, стала разработка конструкции передвижной платформы для разгрузки бортовых автомобилей с прицепом. Нехватка автосамосвалов для растущих объемов перевозки щебня, гравия, песка и других сыпучих дорожно-строительных материалов на значительные расстояния определила актуальность этой работы в 1980-х годах. На сегодняшний день подход к обеспечению объектов строительства транспортом изменился, но конструктивные решения, предложенные при проектировании данной платформы, могут использоваться в конструкциях современного оборудования в дорожном строительстве. В качестве примера можно указать привод механизмов от колес автомобиля [1].

В 1980-х годах машин для дорожной разметки термопластиком не хватало, оборудование и материал для них были дорогими. Разметка большей части городских улиц и дорог осуществлялась краской. Линии разметки очень быстро стирались, и на участках интенсивного движения каждые два-три месяца приходилось возобновлять ее. Кафедра СДМО под руководством Арнольда Борисовича Мясникова решила предложить способ увеличения срока службы линий разметки и провести модернизацию имеющегося оборудования. В результате работы были рекомендованы дополнения в технологию нанесения линий разметки и вариант модернизации маркировочной машины. С целью увеличения срока службы разметки поверхность асфальтобетонного покрытия в зоне нанесения краски предварительно разогревалась и профилировалась катящимся вальцом. Прижимаемый к опорной поверхности валец создавал по ширине линий разметки волнистый профиль с плавно переходящими друг в друга выступами и впадинами. В период эксплуатации разметки краска стирается на выступах и сохраняется во впадинах, линии разметки хорошо различимы на протяжении длительного периода. Для проведения исследований и создания экспериментального образца дорожники передали кафедре маркировочную машину ДЭ-3Б и самоходное шасси Т-16М. В рамках модернизации маркировочной машины была разработана навеска вальца и разогревателя, а также оптимизирован профиль вальца. Линейный разогреватель спроектирован на основе газовых горелок с керамическими инфракрасными излучателями, для его работы выполнены система подвода газа к горелкам и рама крепления двух баллонов со сжиженным газом на базовом шасси. Изготовленный экспериментальный образец разметочной машины прошел испытание при нанесении участка горизонтальной разметки на улице Орджоникидзе у площади Терешковой. Было отмечено, что выполненная новым оборудованием разметка прослужила в два раза дольше.

Традиционно высокий процент работ, выполняемых вручную, сохраняется при очистке полосы отвода автомобильных дорог от древесной растительности. Современные мощные мульчеры и навешенные на экскаватор измельчители кустарника и мелких деревьев с подачей рабочего органа сверху вниз слишком энергозатратны и

используются в ограниченных случаях [2]. В связи с этим кафедра продолжает работы по совершенствованию рабочего оборудования для срезки кустов и мелких деревьев в полосе отвода автодорог. Изначально за прототип рабочего органа была выбрана сельскохозяйственная косилка с возвратно-поступательным движением режущих элементов, рабочий процесс которой изучен в достаточной степени [3]. Поскольку сопротивление срезу мелких деревьев многократно превышает сопротивление срезу травы, для создания необходимого усилия был взят гидроцилиндр, при этом сам рабочий орган выполнен из двух гребенок: подвижной и неподвижной. С целью создания экспериментального образца предварительно изготовили элементы профиля гребенки (по два зуба) с выбранными параметрами и лабораторную установку, включающую раму, гидроцилиндр, устройство закрепления элементов подвижной и неподвижной гребенок. Неподвижный режущий элемент и корпус гидроцилиндра закреплены на раме, подвижный элемент гребенки соединен со штоком гидроцилиндра и прижат направляющим устройством к неподвижному. Гидроцилиндр подключен к маслостанции, а давление в его рабочей полости показывает образцовый манометр. Проведенные лабораторные исследования позволили определить усилия перерезания (с учетом частичного смятия) одним зубом подвижной гребенки древесных прутков разных пород, диаметров и влажности. Появилась возможность моделировать вероятные нагрузки для гребенок с различным числом зубьев и длиной. Для экспериментального образца с шириной захвата 1,4 м и максимальным диаметром срезаемых деревьев 60 мм изготовлены гребенки с девятью режущими зубьями с шагом 160 мм из листовой стали толщиной 30 мм. Высота профиля зуба – 215 мм, снижение составляющей смятия достигалось фрезеровкой кромки режущих зубьев под углом 60°, а исключение поломки рабочего органа в случае попадания в зону резания стального проката и прочих «неперерезаемых» предметов обеспечивается регулировкой предохранительного клапана гидросистемы и элементами навески на базовую машину. Экспериментальный образец испытали, закрепив на раме бульдозерного оборудования трактора ДТ-75Б [4]. В ходе испытаний была подтверждена работоспособность оборудования, а также выявлены недостатки, которые следует устранить при его совершенствовании. Реальные условия работы в полосе отвода из-за неровности не дают увеличить ширину захвата, удлиняя гребенку (линия среза кустарника и деревьев будет проходить слишком высоко). Для получения заданной высоты среза при значительной ширине захвата гребенку рабочего органа следует собирать из отдельных подвижных секций, каждая из которых независимо копирует профиль опорной поверхности. Базовая машина должна иметь гидросистему с возможностью отбора значительной мощности на навесное оборудование для увеличения частоты возвратно-поступательного движения режущих элементов, что позволит увеличить скорость передвижения и производительность.

Разработка новой технологии производства и использования асфальтобетонных смесей для круглогодичного ремонта дорожных покрытий стала на кафедре самой объемной из тематики для дорожного строительства по количеству проведенных исследований и внесенных предложений с целью совершенствования технологий и модернизации оборудования. Работа началась в 1980-е годы с предложения заранее готовить материал для зимнего ямочного ремонта небольшими порциями (на один замес небольшого смесителя-разогревателя), расфасовывая его в пакеты и строго соблюдая состав асфальтобетонных смесей. Проблема возникла с дозировкой дорожного битума, который даже при добавлении в холодную смесь в виде мелких гранул выгорал во время разогрева. Монтировать на ремонтной машине систему разогрева и распыления битума в конце нагрева каменных материалов нерационально. Решение нашлось в совместной дозировке битума и щебня: порция нагретого битума

распылялась на поверхность отдозированного холодного щебня и застывала на ней. Было проведено значительное количество лабораторных экспериментов по распылению битума на щебень, смешиванию с другими компонентами, хранению в морозильной камере и разогреву смеси. Адгезия битума на поверхности крупной фракции каменного материала позволила ему не отрываться при хранении и перемещении, не выгорать при нагреве, а при переходе в жидкое состояние агрегироваться с другими фракциями смеси во время перемешивания. Технология изготовления сухой асфальтобетонной смеси (САБС), пригодной к длительному хранению и перевозке на любые расстояния, способствовала развитию технологии подготовки смеси для ямочного ремонта в зимнее время. Суть технологии производства САБС заключается в отсутствии нагрева каменных материалов, они лишь подсушиваются до технологической влажности [5]. Используется стандартное оборудование асфальтобетонного завода (АБЗ), которое транспортирует, дозирует и подает в смеситель компоненты смеси согласно заданной рецептуре [6]. Битум, нагретый до температуры 160 °С, разбрызгивается форсунками в процессе перемешивания и застывает на поверхности каменных материалов. На выходе из смесителя имеем сыпучую смесь, способную после разогрева на месте укладки соответствовать всем требованиям к горячему асфальтобетону. Описанная технология позволила заготавливать значительные объемы САБС, но в этих объемах проявилось заметное расслоение смеси при длительном хранении. Для предотвращения расслоения и сохранения качественных характеристик САБС при хранении предложено в технологический процесс ввести брикетирование САБС, разработана конструкция пресса, исследованы и оптимизированы его основные параметры [7]. Кроме ранее разработанной технологии использования САБС при зимнем ямочном ремонте с проектированием смесителя-разогревателя, проработаны варианты технологий ее использования весной и летом с расчетом экономической целесообразности. Наряду с работой по совершенствованию технологии приготовления САБС, на перспективу рассматривается технология сушки и обогащения песка (удаления примесей глины) для производства асфальтобетонных и цементобетонных смесей. Выполнена эскизная проработка оборудования для реализации данной технологии. Во время изучения процессов использования стандартного оборудования АБЗ при производстве САБС была разработана конструкция ячеистого бункера для сыпучих материалов, устраняющая расслоение, а для снижения выброса в окружающую среду мелкодисперсной пыли при работе АБЗ – предложена система очистки на основе циклонов со встречными закрученными потоками.

Работы по созданию для грунтоуплотняющих машин новой конструкции гидравлического вибровозбудителя, способного работать в широком диапазоне частот, начались под руководством А.Б. Мясникова еще в 1980 году, когда была предложена модель поршневого типа с отверстиями в корпусе и распределительном кольце, которое надето на цилиндрический корпус и может вращаться. Поршень, соединенный со штоком, делит пространство внутри корпуса на две полости: верхнюю и нижнюю. Рабочая жидкость под давлением подается в обе полости. При вращении распределительного кольца и совпадении отверстий рабочая жидкость сливается то из верхней, то из нижней полости поочередно, а поршень совершает колебательные движения [8, 9]. Такая конструкция позволила получить вибрацию на штоке, который жестко соединялся с поршнем, с частотой более 100 Гц. На основе опыта проектирования подобных конструкций [10, 11] разработаны и изготовлены четыре вибровозбудителя, различающиеся схемой подвода рабочей жидкости, формой отверстий в корпусе и кольце и приводом вращения распределительного кольца. Рабочей жидкостью являлась вода. Привод вращения распределительного кольца,

задающий частоту колебаний, у двух конструкций был в виде струйной турбины, а у двух других осуществлялся от гидромотора через зубчатую передачу. Для сравнительных испытаний вибровозбудителей, работающих на воде, был спроектирован и изготовлен стенд с водяным баком, насосным агрегатом и установочной площадкой для оборудования. Привод гидромотора выполнялся от лабораторной маслостанции. При испытаниях параметры вибрации фиксировали с использованием комплекта виброизмерительной аппаратуры ВИ-6ТН. Все образцы показали свою работоспособность. Было отмечено, что на моделях с приводом от гидромотора легче регулировать параметры вибрации, изменяя частоту вращения распределительного кольца путем дросселирования подачи рабочей жидкости в гидромотор. После стендовых испытаний вибровозбудитель, имевший наибольший диапазон регулирования частоты колебаний, соединен с опорной плитой и опробован при уплотнении грунта (работы проводились в лабораторном грунтовой канале). Получены экспериментальные данные по осадке грунта под плитой при различных режимах уплотнения, задаваемых частотой и амплитудой колебаний. Результаты лабораторных исследований позволили оптимизировать параметры вибровозбудителя и перейти к натурным испытаниям на грунтовых площадках. Выбирается компоновка и выполняется рабочая документация для изготовления прицепной грунтоуплотняющей машины с рабочим органом в виде вальца. В сцепке с колесным трактором изготовленный образец испытан при различных режимах уплотнения и на разных грунтах. В рамках дальнейшего развития конструкций грунтоуплотняющих машин с гидравлическим вибровозбудителем создан вариант прицепной машины с площадочным рабочим органом, способный работать в трамбующем режиме. Для этой машины изготовлен вибровозбудитель с низкой частотой и значительной амплитудой колебаний, а в качестве рабочей жидкости для него использовали минеральное масло. В сцепке с гусеничным трактором тягового класса 10 т изготовленный экспериментальный образец прошел цикл испытаний и показал хорошие результаты уплотнения грунтов [12]. На основе накопленного опыта проектирования и полученных экспериментальных данных сегодня имеется ряд предложений по новым конструктивным схемам уплотняющих машин.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенный обзор показывает объем выполненных работ по четырем направлениям: по дорожной разметке, очистке полосы отвода дорог от кустарника и мелких деревьев, производству и использованию САБС, новым конструкциям уплотняющих машин с гидравлическим вибровозбудителем. Предложенные решения по каждому из направлений не утратили актуальности, ведение работ на новом этапе позволит создать перспективные образцы техники для дорожного строительства. Невозможно разрабатывать прорывные технологии и машины для их реализации без развития научных исследований и опытно-конструкторских работ, и кафедра СДМО продолжает, работу по решению задач механизации дорожного строительства.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Устройство для разгрузки автопоездов*: а. с. 1178670 СССР. № 3419347/27-11 / Мясников А.Б., Савкин А.В. Заявл. 06.04.1982. Оpubл. 15.09.1985. Бюл. № 34.
2. Казаков А.Л., Мажугин Е.И. Машины для расчистки земель от древесно-кустарниковой растительности. Горки: БГСХА. 2014. 32 с.
3. *Сельскохозяйственные и мелиоративные машины* / Г.Е. Листопад [и др.]; под общ. ред. Г.Е. Листопада. М.: Агропромиздат. 1986. 688 с.

4. Масленников Д.Г., Павлов Ю.Н., Кочкян С.М., Кондратьев А.В. Экспериментальное оборудование для срезки древесной растительности в полосе отвода автомобильных дорог // *Образование в пространстве культуры: Сборник научных трудов*. Тверь: ТвГТУ. 2019. С. 116–120.

5. Масленников Д.Г., Павлов Ю.Н., Кочкян С.М., Кондратьев А.В. Особенности производства и использования сухой асфальтобетонной смеси // *Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел, деталей технологического и энергетического оборудования: Межвузовский сборник научных трудов*. Вып. 11. Тверь: ТвГТУ. 2018. С. 138–142.

6. Производство асфальтобетонных смесей и битумных эмульсий: учебно-справочное пособие / под общ. ред. В.В. Силкина, А.П. Лупанова. М.: АСВ. 2021. 368 с.

7. Масленников Д.Г., Кондратьев А.В., Павлов Ю.Н. Исследование прочностных характеристик брикетов из сухой асфальтобетонной смеси // *Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел, деталей технологического и энергетического оборудования: Межвузовский сборник научных трудов*. Вып. 7. Тверь: ТвГТУ. 2014. С. 103–106.

8. *Вибровозбудитель*: а. с. 999330 СССР. № 3253799/18-28 / Мясников А.Б., Мошков А.Г. Заявл. 20.02.1981. Опубл. 23.01.1983. Бюл. № 3.

9. *Вибровозбудитель*: а. с. 1202631 СССР. № 3744973/24-28 / Мясников А.Б., Павлов Ю.Н., Мясников Б.А. Заявл. 28.05.1984. Опубл. 07.01.1986. Бюл. № 1.

10. Варсановьев В.Д., Кузнецов О.В. Гидравлические вибраторы. Л.: Машиностроение. 1979. 144 с.

11. Баранов В.Н., Захаров Ю.Е. Электрогидравлические и гидравлические вибрационные механизмы (теория, расчет и конструкции). М.: Машиностроение. 1977. 325 с.

12. Павлов Ю.Н., Кондратьев А.В., Кочкян С.М., Масленников Д.Г. Грунтоуплотняющая машина с гидравлическим вибровозбудителем // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2019. № 3 (3). С. 56–63.

Для цитирования: Павлов Ю.Н., Кондратьев А.В., Кочкян С.М., Масленников Д.Г. Перспективные разработки для дорожного строительства // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2024. № 4 (24). С. 45–51.

PROSPECTIVE DEVELOPMENTS FOR ROAD CONSTRUCTION

Yu.N. PAVLOV, Cand. Sc. A.V. KONDRATYEV, Dr. Sc.,
S.M. KOCHKANYAN, Cand. Sc., D.G. MASLENNIKOV, Cand. Sc.

Tver State Technical University
22, Af. Nikitin emb., 170026, Tver, e-mail: pavlov237@yandex.ru

The paper presents an overview of research and development work carried out at the Department of Construction, Road Machinery and Equipment of Tver State Technical University for the mechanization of road construction. The developments that remain promising and for which research is still in progress are selected. It is noted that for the majority of them the work from problem statement to creation and testing of experimental sample has been carried out, and in the course of this work new ideas for improvement of technologies and constructions have appeared. Descriptions and some results of studies or

*Вестник Тверского государственного технического университета.
Серия «Технические науки». № 4 (24), 2024*

tests of equipment for road marking, cutting bushes and small trees in the highway right-of-way, patching, preparation of dry asphalt concrete mixes and vibratory compaction of soils are given.

Keywords: road markings, right-of-way of highways, cutting of bushes and small trees, dry asphalt concrete mix, pit (pothole) repair, vibration exciter, soil compacting machine.

Поступила в редакцию/received: 01.10.2024; после рецензирования/revised: 08.10.2024; принята/accepted: 14.10.2024

УДК 622.23.05

ПОВЫШЕНИЕ КОРРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ ГОРНЫХ МАШИН

В.У. МНАЦАКАНЯН¹, д-р техн. наук, С.Х. НГУЕН¹, асп.,
В.Н. НГО², канд. техн. наук

¹Университет науки и технологий МИСИС,
119049, Москва, Ленинский пр., 4, стр. 1, e-mail: artvik@bk.ru

² Университет Ту Дау Мот,
Вьетнам, г. Ту Дау Мот, ул. Тран Ван Он, 6, e-mail: nguyennv@tdmu.edu.vn

© Мнацаканян В.У., Нгуен С.Х., Нго В.Н., 2024

Представлены результаты экспериментальных исследований коррозионной стойкости стальных образцов, покрытых антикоррозионными составами, в 3,4%-м растворе хлорида натрия. Установлено, что металлокерамические покрытия на основе композитов $Zn + Al_2O_3$ и $Al + Zn + Al_2O_3$, сформированные холодным газодинамическим напылением, существенно повышают сопротивляемость коррозии в морской воде у сварных соединений из стали, а также монолитных стальных образцов.

Ключевые слова: электрохимическая коррозия, сварные соединения, скорость коррозии, морская вода, холодное газодинамическое напыление, защитные покрытия, коэффициент анодной защиты.

DOI: 10.46573/2658-5030-2024-4-51-58

ВВЕДЕНИЕ

Потери от коррозии и износа в горнодобывающей промышленности Вьетнама, где добыча твердых полезных ископаемых ведется как на суше, так и в прибрежных районах Южно-Китайского моря, имеют колоссальные масштабы. Жесткие условия эксплуатации горных машин, характеризующиеся наличием абразивных сред, а также динамических и циклических нагрузок, в тропическом климате страны существенно усугубляются высокой влажностью воздуха и воздействием агрессивной морской среды, что приводит к интенсивной коррозии металлоконструкций и их ускоренному разрушению. Особенно чувствительны к морской атмосфере сварные соединения, широко применяемые при сборке, монтаже и ремонте горных машин, в частности карьерных экскаваторов, составляющих основную часть выемочной техники. Для ремонта несущих и базовых элементов металлоконструкций горных машин применяют технологии сварки и наплавки [1–5].

Коррозионные повреждения деталей приводят к большим расходам на ремонт и обслуживание горной техники, что определяет потребность в применении эффективных способов защиты сварных соединений от коррозионного износа на этапе ремонта за счет формирования на восстанавливаемых сваркой или наплавкой локальных поверхностях коррозионно-стойких покрытий. К числу таких методов относится процесс холодного газодинамического напыления.

Цель работы – повышение эксплуатационных свойств восстанавливаемых сваркой несущих металлоконструкций горных машин, эксплуатируемых в условиях воздействия агрессивной морской среды, за счет применения защитных покрытий, сформированных холодным газодинамическим напылением.

ФАКТОРЫ И МЕХАНИКА КОРРОЗИОННЫХ РАЗРУШЕНИЙ

Известно, что склонность сварных конструкций к разрушениям (\bar{K}) в агрессивных средах обусловлена рядом факторов, из которых определяющее влияние оказывают свойства материала конструкции \bar{M} , напряженное состояние сварного соединения \bar{N} , вид и свойства агрессивной среды \bar{C} [6]:

$$\bar{M} + \bar{N} + \bar{C} \rightarrow \bar{K}. \quad (1)$$

Под воздействием морской воды (атмосферы) в сварных соединениях возникает электрохимическая коррозия, которая, стремительно развиваясь, приводит к различным видам разрушений. Характер и механика разрушения зависят от интенсивности, знака и цикличности напряжений первого σ_I и второго σ_{II} рода, запаса и концентрации потенциальной энергии первого W_I и второго W_{II} рода; исходных свойств материала конструкции $M_{и}$ и неоднородности свойств, приобретенных в процессе технологии изготовления конструкции $M_{т}$, определяющих степень термодинамической и электрохимической неустойчивости материала сварного соединения; химического состава C_x , температуры и продолжительности воздействия, а также характера контактирования сварного соединения со средой C_b :

$$K \leftarrow \begin{cases} N = f(\sigma_{I,II}, W_{I,II}); \\ M = f(M_{и}, M_{т}); \\ C = f(C_x, C_b). \end{cases} \quad (2)$$

Использование преимущественно термической сварки (например, ручной электродуговой) при ремонте металлоконструкций горных машин или в среде защитных газов приводит к образованию неоднородной структуры сварного шва и околошовной зоны. Эти участки обладают различной величиной электрохимических потенциалов, усиливающих эффект проявления электрохимической коррозии в различных электролитах, поэтому скорость коррозии сварных соединений в несколько раз превышает аналогичный показатель для монолитных конструкций. Процесс электрохимической коррозии усугубляется наличием в сварном соединении пористости, что также способствует активному местному разрушению металла. Таким образом, сварное соединение следует рассматривать как сложную многоэлектродную систему (рис. 1а). Агрессивное воздействие морской воды на сталь обусловлено в первую очередь присутствием в среде ионов хлора Cl^- , обладающих депассивирующим эффектом (рис. 1б) [7]. Необходимо дать пояснения обозначений на рис. 1. Римской цифрой I обозначены начальные макропотенциалы в сварном соединении; II – схема макроэлектрохимической коррозии в макропарах: «основной металл – зона термического влияния (з. т. в.)»; «з. т. в. – шов»; «основной металл – шов + з. т. в.»; III –

схема самораспространения; $\varphi_{ш}$, $\varphi_{з.т.в.}$, φ_M – электродный потенциал шва, зоны термического влияния и основного материала соответственно; $\varphi_{уст}$ – установившийся стационарный потенциал поляризованной системы «шов – з. т. в. – основной металл»; 1 – гетерогенный механизм электрохимической коррозии; 2 – гомогенный механизм электрохимической коррозии; 3 – химическая коррозия; Me – металл; D – деполаризатор.

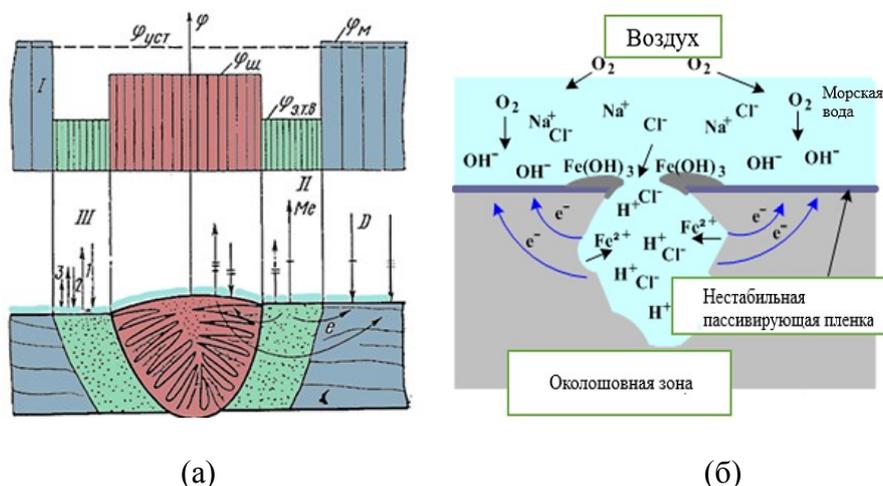


Рис. 1. Схема электрохимической коррозии сварного соединения: сварное соединение как многоэлектродная система [1] (а); схема протекания окислительно-восстановительных реакций на поверхности стали вблизи неоднородного сварного шва при взаимодействии с морской средой (б)

Вследствие малой, по сравнению с основным металлом, площади сварного шва и околошовной зоны (з. т. в.) плотность коррозионного тока в этих областях будет достаточно высока, что приведет к высокой скорости растворения металла. Для макрогальванического элемента «основной металл – сварное соединение» коррозионный ток определяется выражением

$$I_{кор} = F_c i_c = F_M i_M, \quad (3)$$

где $F_M i_M$, $F_c i_c$ – площадь и плотность тока основного металла и сварного соединения.

Так как $F_M \gg F_c$ и $i_c \gg i_M$, то в агрессивной атмосфере более интенсивно самопроизвольная коррозия будет протекать в сварном соединении, а именно в тех зонах, где больше величина разброса потенциалов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Подавить процессы электрохимической коррозии в сварном соединении возможно за счет применения защитных антикоррозионных покрытий.

Способы защиты от электрохимической коррозии и применяемые покрытия подразделяют на катодные и анодные. Первые (Cu, Ni, Au, Ag, и др.), имеющие более положительные значения потенциалов в агрессивной среде, осуществляют надежную защиту стали, но при нарушении целостности покрытий способствуют образованию гальванического элемента, где анодом служит основной металл, который начинает растворяться, а на покрытии-катоде происходит восстановление водорода [8].

Анодные покрытия (на основе Zn, Cd, Al) предпочтительнее, так как они менее чувствительны к нарушению сплошности. В этом случае важно правильно определить толщину анодного покрытия для обеспечения надежной защиты сварного соединения в

течение межремонтного периода эксплуатации. Для этого должны быть известны такие параметры, как скорость коррозии K анодного покрытия и линейный показатель коррозии h_c , определяемые экспериментальным путем, поскольку расчетными методами оценить их точно не представляется возможным.

При сравнении различных способов нанесения защитных покрытий выявлены несомненные достоинства метода холодного газодинамического напыления (ХГН), сущность которого заключается в формировании покрытий с помощью высокоскоростного потока порошковых частиц металла, находящихся в твердом состоянии. Колоссальная кинетическая энергия твердых частиц, движущихся со сверхзвуковой скоростью, приводит к их высокоскоростной деформации при столкновении с подложкой и образованию прочных адгезионных связей, при этом пористость покрытий не превышает 3 %, что весьма существенно для защиты сварных швов. ХГН-процесс достаточно легко реализовать в ремонтном производстве, особенно при локальном ремонте. Он хорошо совмещается с процессом наплавки или сварки и может быть применен в полевых условиях [9].

Для выявления антикоррозионных свойств покрытий, рекомендуемых для защиты элементов горного оборудования от морской воды, были подготовлены плоские стальные образцы прямоугольной формы из низко- и среднеуглеродистых легированных сталей марок 25Х и 40Х. Часть образцов оставалась без покрытий, тогда как на вторую и третью были нанесены покрытия на основе порошковых композиций составов $Zn + Al_2O_3$ и $Al + Zn + Al_2O_3$. Выбор материалов покрытий обусловлен их приемлемой стоимостью, а также необходимостью получения достоверной информации о степени защиты ими сварных швов от морской коррозии.

Верхняя и нижняя поверхности образцов обрабатывались шлифованием. На образцы наносилось защитное покрытие полностью со всех сторон (рис. 2а). Толщина покрытий составляла 0,3...0,4 мм. В эксперименте также использовали сварные стальные образцы из низкоуглеродистой легированной стали (рис. 2б), при этом сварной шов формировался методом аргоно-дуговой сварки.

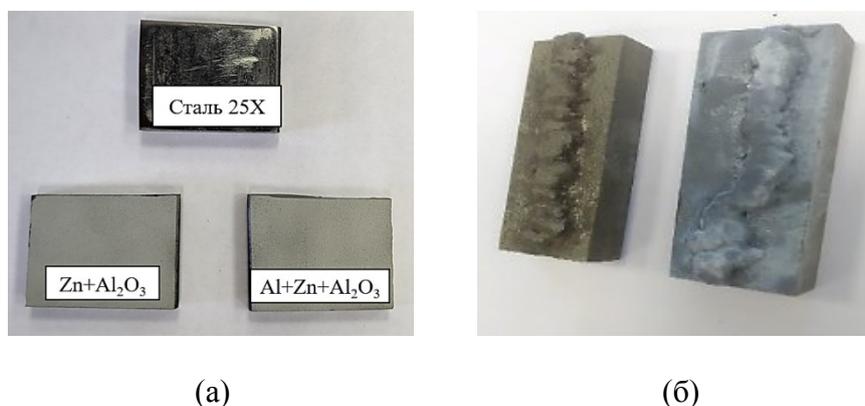


Рис. 2. Подготовленные образцы для проведения экспериментальных исследований: в виде монолитных пластин (а); сварные с покрытием и без него (б)

Наличие оксида алюминия в составе покрытий обусловлено спецификой процесса ХГН. Его присутствие в порошковых составах улучшает условия подачи порошка в сопловое устройство, а также повышает коррозионную стойкость покрытий.

Покрытия формировались при помощи аппарата «Димет-405» с предварительной струйно-абразивной очисткой поверхностей экспериментальных образцов частицами электрокорунда для обеспечения лучшего сцепления покрытия с основой. Масса

образцов до и после коррозионных испытаний определялась на аналитических весах с точностью до 0,001 г.

Напыление покрытий выполнялось при следующих условиях: давление сжатого воздуха $P = 0,5...0,6$ МПа, дистанция напыления $L = 10...12$ мм, дисперсность порошковых частиц $\delta = 35...40$ мкм, температура высокоскоростного газового потока $310...360$ °С. Прочность сцепления составляла не менее 30 МПа, пористость находилась в пределах 3,0...3,5 %; шероховатость покрытий Ra – в пределах 3,6...5,0 мкм.

Все образцы помещали в стеклянные емкости с раствором морской соли (NaCl) с периодическим погружением. Концентрация раствора соли соответствовала ее содержанию в морской воде Южно-Китайского моря и составляла 32...34 г/л [10]. В помещении, где проходил эксперимент, поддерживали температуру воздуха 27...28 °С, температура солевого раствора находилась в пределах 24...25 °С. Таким образом, условия эксперимента были приближены к условиям тропического климата Вьетнама. Продолжительность эксперимента – 60 сут.

Через каждые 10 сут образцы промывали, очищали от продуктов коррозии, просушивали феном и повторно взвешивали на аналитических весах. Скорость коррозии по гравиметрическому (весовому) показателю K ($\frac{\text{г}}{\text{м}^2 \cdot \text{сут}}$) рассчитывали на основе формулы

$$K = \frac{\Delta m}{S \cdot \tau}, \quad (4)$$

где Δm – изменение массы образца, г; S – площадь поверхности образца, м^2 ; τ – продолжительность воздействия коррозионной среды на образец, сут.

Эффективность анодной защиты $K_{3,a}$ определялась отношением скорости коррозии без защиты $K_{б,з}$ к скорости коррозии под защитой K_3 :

$$K_{3,a} = K_{б,з} / K_3, \quad (5)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Анализ результатов экспериментов показал, что коррозия сварного соединения без покрытия протекает более активно. На рис. 3 представлены фотографии стальных сварных образцов в процессе испытаний в морской воде. Очаги коррозии зарождаются в околошовной зоне уже на четвертые сутки (рис. 3б), а далее коррозия распространяется по всей поверхности образца (рис. 3в).



Рис. 3. Фотографии стальных сварных образцов с покрытием и без него при испытании в морской воде в течение 10 сут (а) и после извлечения образцов без покрытия из раствора через 4 сут (б); 10 сут (в)

Установлено, что скорость коррозии не является постоянной величиной (рис. 4). Для всех образцов в первые сутки испытаний она достигает максимальных значений, затем постепенно снижается, что в большей степени выражено для монолитного стального образца без покрытия и образца с покрытием $Zn + Al_2O_3$. В то же время скорость коррозии образца с покрытием $Al + Zn + Al_2O_3$ остается практически неизменной. При этом коэффициент эффективной анодной защиты покрытий $K_{э,а}$ для сварного соединения составляет 32...36, а для монолитного стального образца – 7...8.

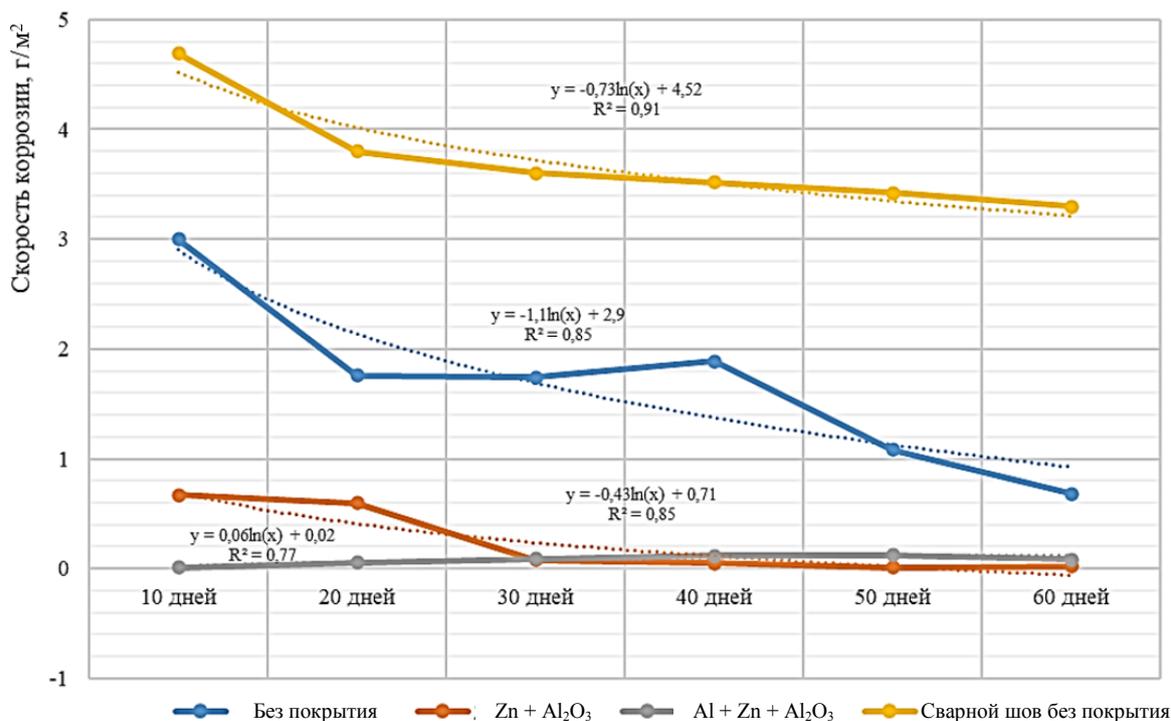


Рис. 4. Изменение скорости коррозии образцов с покрытиями и без в морской воде с периодическим погружением

К концу испытаний скорость коррозии стабилизируется у всех образцов, достигая минимума. Для сварного соединения она также снижается, но остается достаточно высокой, если сравнить с монолитным образцом без покрытия.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведения экспериментальных исследований коррозионной стойкости стальных образцов в морской воде с покрытиями, сформированными ХГН, было установлено:

1) применение алюмоцинковых и цинковых покрытий предотвращает электрохимическую коррозию основного металла и тем самым продлевает ресурс сварных металлоконструкций;

2) лучшими защитными свойствами в морской воде обладает покрытие на основе композиции $Al + Zn + Al_2O_3$. Вероятно, высокая коррозионная стойкость алюмосодержащего покрытия в морской воде обусловлена достаточно сильным наклепом частиц алюминия при напылении покрытия, благодаря чему в каждом элементарном слое покрытия возникают сжимающие напряжения, повышающие сопротивляемость коррозии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кузин Е.Г., Пудов Е.Ю., Дубинкин Д.М. Анализ отказов узлов карьерных самосвалов в условиях эксплуатации // *Горное оборудование и электромеханика*. 2021. № 2. С. 55–61.
2. Дефекты металлоконструкции карьерных экскаваторов / А.П. Богданов [и др.] // *Universum: Технические науки*. 2015. № 11 (22). URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/2775> (дата обращения: 15.10.2024).
3. Власов Ю.А., Спиринов Е.Н., Ляпин А.Н., Ляпина О.В., Чечулин К.Н. Анализ причин низкой эксплуатационной надежности карьерных автосамосвалов // *Научное обозрение. Технические науки*. 2016. № 5. С. 37–44.
4. Кривоносова Е.А., Акулова С.Н., Мышкина А.В. К проблеме коррозионного разрушения сварных швов // *Вестник ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение*. 2017. Т. 19. № 3. С. 114–137.
5. Состояние и перспективы ремонтных работ восстановления изношенных деталей горно-металлургического оборудования / М. Эргашев [и др.] // *Universum: Технические науки*. 2024. № 5 (122). С. 59–64. URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/17622> (дата обращения: 15.10.2024).
6. Стеклов О.И. Прочность сварных конструкций в агрессивных средах. М.: Машиностроение. 1976. 199 с.
7. Lê Thị Hồng Liên Ăn mòn và phá hủy vật liệu kim loại trong môi trường khí quyển nhiệt đới Việt Nam // *Vietnam Journal of Science and Technology*. 2012. V. 50. № 6. P. 795–823.
8. Картер В.И. Металлические противокоррозионные покрытия / пер. с англ. Г.Н. Носовой. Л.: Судостроение. 1980. 167 с.
9. Каширин А.И., Шкодкин А.В. Метод газодинамического напыления металлических покрытий: развитие и современное состояние // *Упрочняющие технологии и покрытия*. 2007. № 12 (36). С. 22–33.
10. Хорн Р. Морская химия: структура воды и химия гидросферы. М.: Мир. 1972. 398 с.

Для цитирования: Мнацаканян В.У., С.Х. Нгуен, В.Н. Нго. Повышение коррозионной стойкости металлоконструкций горных машин // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2024. № 4 (24). С. 51–58.

IMPROVING THE CORROSION RESISTANCE OF MINING MACHINES METAL STRUCTURES

V. U. MNATSAKANYAN¹, Dr. Sc., X.H. NGUYEN¹, Postgraduate,
V.N. NGO², Cand. Sc. in Technical Sciences

¹University of Science and Technology MISIS,

¹Building 1, 4, Leninsky pr., Moscow, 119049, e-mail: artvik@bk.ru

²Thu Dau Mot University,

6, Tran Van On str., Thu Dau Mot, Vietnam, e-mail: nguyennv@tdmu.edu.vn

The results of experimental studies of the corrosion resistance of steel samples coated with anticorrosive compounds in a 3.4 % sodium chloride solution are presented. It has been found that metal-ceramic coatings based on Zn + Al₂O₃ and Al + Zn + Al₂O₃ composites formed by cold gas-dynamic spraying significantly increase the corrosion resistance in seawater of welded steel joints, as well as monolithic steel samples.

Keywords: electrochemical corrosion, welded joints, corrosion rate, seawater, cold gas dynamic spraying, protective coatings, anodic protection coefficient.

Поступила в редакцию/received: 01.10.2024; после рецензирования/revised: 08.10.2024;
принята/accepted: 15.10.2024

УДК 622.331

ВЛИЯНИЕ ВИДА ФРЕЗЕРУЮЩЕГО АГРЕГАТА НА КАЧЕСТВЕННЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ТОРФА ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ГРУНТОВ

К.Л. ШАХМАТОВ, канд. техн. наук, О.В. ПУХОВА, канд. техн. наук,
К.Ю. ЖЕНИХОВ, ст. препод.

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

© Шахматов К.Л., Пухова О.В., Женихов К.Ю., 2024

В статье рассмотрены вопросы подбора фрезерующего агрегата для добычи торфа в целях производства грунтов с наименьшими затратами и повышенными качественными показателями. Отмечено, что для удовлетворения технологических условий при выполнении фрезерования существует множество конструкций фрезерующих устройств. Указано, что в исследованиях непосредственно на полях добычи с последующими операциями сушки и уборки были использованы агрегируемые с гусеничным трактором ДТ-75Б фрезер МТФ-14, плоскорез ПТ-09 и пассивная фреза ФПТ-09; глубина фрезерования составляла 0,02 м. Получено, что после фрезерования на поверхность залежи достаточно равномерно укладывались в слой частицы разного размера, толщина которого предопределялась коэффициентом разрыхления (у плоскореза ПТ-09 он составил 1,7 по сравнению с 1,4 у фрезера МТФ-14 и пассивной фрезы ФПТ-09). Установлено, что фракционный состав крошкообразного торфа находился в зависимости от природных свойств торфа залежи, а также от конструкции фрезы и режима фрезерования. При этом он был неоднороден с большим количеством частиц с крупностью более 5 мм, что повысило качественные показатели (большая водоудерживающая способность и одновременно воздухопроницаемость). На основе исследований выявлено, что длительность сушки торфяной крошки зависела от процентного содержания фракций, на которое повлияли природные и технологические факторы (тип и вида торфа, степень разложения, влажность верхнего слоя залежи, тип фрезерующего агрегата, рабочая скорость). Сделан вывод, что использование плоскореза ПТ-09 для фрезерования залежи позволяет снизить производственные издержки и получить торф с повышенными качественными показателями, тем самым улучшить экономические показатели участка.

Ключевые слова: фрезерование, торф, торфяная залежь, фрезерующий агрегат, глубина фрезерования, торфяная крошка.

DOI: 10.46573/2658-5030-2024-4-58-67

ВВЕДЕНИЕ

Тверская область инвестиционно привлекательна для организации предприятий по добыче и переработке торфа, так как обладает большим потенциалом запасов [1–4]. С 2014 года в России введено продовольственное эмбарго [5], запрещающее ввоз в страну «отдельных видов сельскохозяйственной продукции, сырья и продовольствия, страной происхождения которых является государство, принявшее решение о введении экономических санкций в отношении российских юридических и (или) физических лиц или присоединившееся к такому решению», что способствовало активному развитию сельскохозяйственного производства. В связи с этим интерес к данной сфере ежегодно растет [5–8], наблюдается ажиотажный спрос на продукцию (особенно с февраля по сентябрь), товар не залеживается на складе. Для развития сельского хозяйства, выращивания экологически безопасной и чистой продукции необходимо достаточное количество торфяных грунтов, поэтому добыча торфа повышенной влажности и укрупненной торфяной крошки актуальна в настоящее время. На основе современного оборудования и технологий модернизируются давно работающие предприятия [9–12], а кроме того, ведутся инновационные разработки в области добычи и переработки торфа [13–15].

Торф для сельскохозяйственного применения добывается разработанным в начале XX века фрезерным способом с поверхностно-послойной системой разработки [16]. В результате работы фрезерующего агрегата (рис.1) элементы фрезы, описывая кривую и соприкасаясь с залежью, режущей кромкой ножей вдавливают и сминают срезаемый торфяной слой с поверхности залежи. На фрезерующих агрегатах используются разнообразные ножи: в форме штифтов, тарельчатые (чашечные) параллельные оси фрезы или с винтообразной режущей кромкой. При срезании происходит деформация слоя и получается торфяная крошка различных форм и размеров. Средневзвешенный диаметр в зависимости от выбора фрезы варьируется от 1 до 25...40 мм. Растительные волокна растений-торфообразователей, входящих в состав торфа, способствуют сохранению водно-воздушного баланса. Сырьем для сельскохозяйственного использования [17] являются содержащиеся в торфе питательные вещества и микроэлементы (гуминовые кислоты, калий, фосфор, кальций, азот). Эти вещества повышают плодородие почвы, помогая активному росту растений, и за счет содержания растительных волокон улучшают аэрацию и водопроницаемость. Кроме того, они обеззараживают вредные патогенные бактерии и поддерживают здоровый габитус растений, контролируют необходимый уровень кислотности почвы. В зависимости от типа применяемого фрезерующего агрегата и ножей [18–20] идут процессы перемешивания и укладки торфяных частиц на поверхность карты в слой для сушки. Во время этого создается неравномерность расстила торфяной крошки, из-за чего продлевается ее сушка [21].

Цель работы заключается в том, чтобы выбрать фрезерующий агрегат в эффективной технологической схеме добычи фрезерного торфа для сельскохозяйственного использования.



Рис. 1. Процесс фрезерования торфяной залежи верхового типа

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследование выполнялось на торфяных картах производственной площадки добычного участка месторождения «Оршинский Мох», которое находится в Тверской области, а точнее, во впадине морской равнины без активного стока. Геологическое строение сложено породами кембрия, представленными глинами твердой консистенции и четвертичными отложениями (мореной, озерно-ледниковыми и болотными отложениями). На основе полевых и лабораторных анализов определены качественные показатели торфа на участке (табл. 1).

Таблица 1. Качественные показатели торфа на экспериментальной площадке

Наименование	Ед. изм.	Значение
Тип залежи	–	Верховой
Вид торфа	–	Пушицево-сфагновый
Средняя глубина залежи	м	2
Степень разложения	%	28
Зольность	%	2,6
Пнистость	%	0,7
Естественная влажность	%	88,4
Кислотность (солевая вытяжка)	–	3,34
Полная влагоемкость	кг/кг	13,8
Условная удельная поверхность	м ² /кг	278

Состав фракций частиц фрезерной крошки зависит от природных свойств торфа в залежи, а также от конструкции фрезы и режима фрезерования. Чтобы создать лучшие условия их сушки в технологии добычи бункерными уборочными машинами с механическим принципом сбора, частицы должны иметь размер в пределах 10...20 мм. Результаты определения фракционного состава торфа в залежи приведены в табл. 2.

Таблица 2. Фракционный состав торфа

Размер фракции	Процентное содержание фракций p_i , %								Итог
	>25	>10	>7	>5	>3	>2	>1	<1	
Карта № 1	20	20,1	23,4	19,4	5,6	5,0	3,6	2,9	100
Карта № 2	20,3	23,2	23,6	18,6	6,4	4,1	2,3	1,5	100

Полученный анализ процентного содержания фракций торфа показывает, что он неоднороден, существует большое количество частиц размером более 5 мм. За счет этого торф, используемый в сельском хозяйстве, имеет водоудерживающую способность. Грунты должны быть влагоемкими и вместе с тем воздухопроницаемыми, а такие параметры поддерживают фракции размером более 7 мм.

Сезон добычи торфа длился с 14 мая по 1 сентября и характеризовался очень хорошими метеорологическими показателями: среднесуточной температурой воздуха +21 °С, относительной влажностью воздуха 60 % и среднемесячными осадками в количестве 55 мм.

Технологическая площадка состояла из восьми карт: длина составляла 450 м, ширина – 20 м. В связи с благоприятными условиями сезона плановые технологические показатели добычного участка были достигнуты (табл. 3).

Таблица 3. Технологические показатели добычного участка

Наименование	Ед. изм.	Значение
Количество циклов	цикл	26
Продолжительность цикла	сут	2
Цикловой сбор	т/га	32,5
Сезонный сбор	т/га	845
Площадь участка, брутто	га	60
Площадь участка, нетто	га	54
Программа добычи	тыс. т	45,63

Для выполнения технологических требований при фрезеровании залежи создано множество конструкций фрезерующих агрегатов [22–24]. Фрезерование (рис. 2) торфа проводилось тремя фрезерами, агрегатируемыми с гусеничным трактором ДТ-75Б непосредственно на полях добычи, с последующими операциями сушки и уборки. Глубина фрезерования во всех опытах составляла 0,02 м.



Рис. 2. Оборудование для поверхностно-послойного фрезерования торфяной залежи: фрезер МТФ-14 (а); плоскорез ПТ-09 (б); пассивная фреза ФПТ-09 (в)



(в)

Рис. 2. Продолжение

Рабочими элементами МТФ-14 (см. рис. 2а) являются проходные ножи, расположенные на фрезе параллельно ее оси. Отдельные секции фрезы шарнирно соединены между собой для лучшего вписывания в неровности поля. Специальные штурвалы и винты позволяют изменять положение по вертикали относительно рамы и катков, чем и обеспечивается различное заглубление рабочих элементов в торфяную залежь. У плоскореза ПТ-09 (рис. 2б) рабочим органом является фреза с ленточными проходными ножами. Пассивная фреза ФПТ-09 (см. рис. 2в) – конструкция из компонентов, позволяющая выравнивать поле на протяжении всего цикла добычи торфа. Такая конструкция позволяет избежать монтажа отдельных подшипниковых элементов. Лезвия рыхлителя произведены из износостойчивого металла лучшего качества. Сами рыхлительные фрезы прикрепляются к тягово-сцепному механизму за трактором.

Толщину сфрезерованного слоя торфяной крошки определяли линейными замерами, насыпную плотность – весовым методом с применением пурки, влажность торфяной крошки – влагомером ВТ-350, водопоглощаемость – намоканием в течение 48 ч. Для ежедневной фиксации метеорологических показателей использовалась психометрическая будка, для выпавших осадков – осадкомер Третьякова, а для фиксации испарения с поверхности торфяной залежи – испаритель Топольницкого. Чтобы определить начало фрезерования, строили цикловые графики.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В целях улучшения и ускорения сушки торфяной крошки в размельченном и разрыхленном слое фрезерующие агрегаты создали ее слой с частицами оптимального размера, более или менее однородными по величине. Кроме того, они обеспечили равномерную глубину фрезерования и расстила фрезерной крошки. На рис. 3 представлены виды расстилов торфяной крошки после фрезерования. Можно увидеть, что пассивный фрезер ПТ-09 создал расстил, характеризуемый одномерностью глубины нафрезерованного слоя и фракционным составом из частиц торфа укрупненного размера, а у МТФ-14 и ФПТ-09 немного неравномерный слой с крошкой меньшего размера.

В процессе фрезерования на поверхность залежи достаточно равномерно укладывались в слой частицы разного размера. Глубина этого слоя предопределялась коэффициентом разрыхления. С увеличением высоты расстила торфяной крошки слой увеличился в 2 раза. Исследования показали, что на коэффициент разрыхления оказали влияние фракционный состав и укладка торфяных частиц на поле сушки.



(а)

(б)

Рис. 3. Виды расстила торфяной крошки после фрезерования:
МТФ-14 и ФПТ-09 (а); ПТ-09 (б)

Характеристики торфяной крошки представлены в табл. 4. На интенсивность полевой сушки на поверхности технологических карт большое влияние оказывала толщина нафрезерованного расстила, от которой в конечном итоге зависят цикловые сборы. Интенсивность сушки единицы объема торфа обуславливалась критерием стружкообразования, который характеризуется качеством стружкообразования: фракционным составом и равномерностью расстила.

Таблица 4. Качественные характеристики торфяной крошки

Показатель	Ед. изм.	МТФ-14, ФПТ-09	ПТ-09
Влажность	%	78,2	78,6
Насыпная плотность	т/м ³	701	802
Коэффициент разрыхления	–	1,4	1,7
Размеры частиц более 7 мм	%	26	62

Исследованиями установлено, что длительность сушки торфяной крошки зависела от процентного содержания фракций, на которое повлияли природные и технологические факторы (тип и виды торфа, степень разложения, влажность верхнего слоя залежи, тип фрезерующего агрегата, рабочая скорость). Плоскорез создал равномерный расстил крошки с размером частиц, который подтвердился исследованиями и составил 10...25 мм. Фракционный состав торфяной крошки оценивали средневзвешенным диаметром (рис. 4), а диаметр и способ укладки частиц в нафрезерованном слое влияли на высоту расстила. При сравнении сушки трех разных расстилов торфа было установлено, что расстил с торфяной крошкой, где преобладали частицы крупных фракций, высох на 25 % быстрее, чем расстил, сфрезерованный МТФ-14 и ФПТ-09, где частицы торфа преобладали в более мелких фракциях. Это объясняется более высоким коэффициентом разрыхления, а также внутренним строением торфяной крошки: чем крупнее частица, тем больше расстояния внутри нее, тем лучше происходил внутренний воздухообмен и тем легче проходило испарение влаги по внутренним капиллярам.

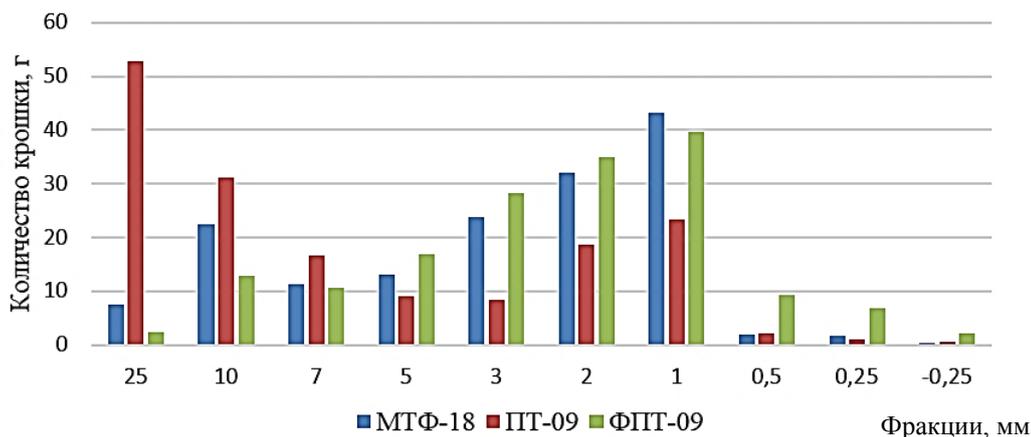


Рис. 4. Фракционный состав торфяной крошки с использованием различных фрезеровочных агрегатов

При производстве грунтов с целью применения в сельском хозяйстве требуются частицы торфа крупностью больше 7 мм, так как в процессе производства грунтов на промышленной установке он подвергается истиранию. Если фрезерная крошка изначально имеет большинство мелких фракций, то грунт в конечном итоге обладает пониженными качественными показателями. На рис. 5 представлено изменение водопоглощения B во времени t .

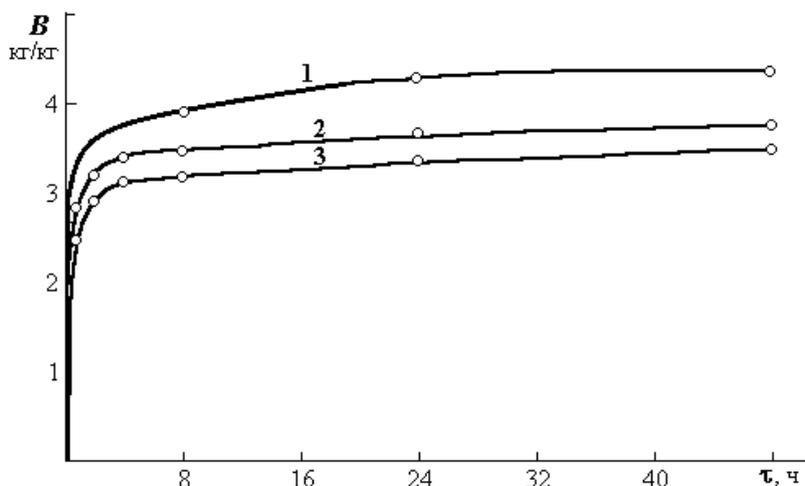


Рис. 5. Кинетика водопоглощения фрезерной крошки типами фрезерующих агрегатов: 1 – плоскорезом ПТ-09; 2 – пассивной фрезой ФПТ-09; 3 – фрезером МТФ-14

Водопоглотительная способность торфяной крошки после плоскореза на 70 % выше, чем после пассивной фрезы и фрезера, поскольку частицы крупностью более 7 мм поглотили и удержали большее количество воды.

В результате получилась смесь, обладающая важным свойством – однородной консистенцией (7...10 мм). Благодаря этому при добавлении данного грунта в землю увеличивается количество гумуса. Тем самым повышается плодородность почвенного слоя и снижается кислотность, что обеспечивает доступ ко всем необходимым для растений веществам. Повышенная рыхлость почвы пассивно улучшает циркуляцию воздуха и влаги в корнеобитаемом слое.

Проведенные расчеты технико-производственных показателей продемонстрировали, что при работе плоскореза увеличилась производительность труда на 15 %, а трудоемкость и удельный расход топлива снизились на 6,9 и 14,8 % соответственно. В целом это привело к снижению удельной себестоимости добытой торфяной крошки на 13,1 %.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование позволяет сделать следующие выводы.

1. В процессе фрезерования залежи у всех фрезерующих агрегатов режущие элементы фрез описывали циклоидальные кривые. При этом отрывались или срезались торфяные стружки различных размеров (как толщины, так и длины) и представляли собой совокупность частиц в диапазоне 1...40 мм. Размельчение залежи позволило увеличить площадь поверхности частиц по сравнению с поверхностью залежи и интенсифицировать процесс полевой сушки крошки. Благодаря меньшему взаимодействию торфяных частиц с залежью снижается их подпитка из нижележащих слоев.

2. Сушка торфяной крошки проходит быстрее именно после фрезерования плоскорезом вследствие образования частиц наибольшего размера. Данная сформировавшаяся фракция будет отлично подходить для использования почвогрунтов в сельском хозяйстве. Кроме того, ее водопоглотительная способность на 70 % выше, чем после пассивной фрезы и фрезера, поскольку частицы более 7 мм поглотили и удержали большее количество воды.

3. При фрезеровании плоскорезом выполнены необходимые требования: заданная одинаковая по всей площади карты глубина фрезерования составила 0,02 м, а также был получен однородный расстил с размером поперечника частиц более 10 мм.

Таким образом, использование плоскореза ПТ-09 для фрезерования залежи позволяет сократить производственные издержки и получить торф с повышенными качественными показателями, за счет чего можно улучшить экономические показатели участка.

ЛИТЕРАТУРА

1. 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.

2. Мисников О.С., Тимофеев А.Е. О рациональном использовании энергетических и минеральных ресурсов торфяных месторождений // *Горный журнал*. 2008. № 11. С. 59–63.

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

4. 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.

5. О применении отдельных специальных экономических мер в целях обеспечения безопасности Российской Федерации: указ Президента Российской Федерации от 6 августа 2014 года № 560. URL: <https://base.garant.ru/70711352/?ysclid=m2enw09jip807872541> (дата обращения: 15.10.2024).

6. Бородина Т.А., Соловьева Н.А. Повышение эффективности производства продукции растениеводства на основе применения торфа // *Социально-экономический и гуманитарный журнал*. 2019. № 1 (11). С. 46–60.

7. Горбунов А.В., Олейникова Л.Н., Горбунов А.А., Олейников А.А. Приоритетные направления использования торфа и выработанных торфяников – рациональное земледелие // *Теория и практика мировой науки*. 2020. № 10. С. 41–44.
8. Пешкова Г.Ю., Бондарь Е.Г. Предпосылки развития торфяной промышленности Северо-Западного региона // *Экономика Северо-Запада: проблемы и перспективы развития*. 2020. № 4 (63). С. 141–147.
9. Краковецкий А.В. Экономико-географическая оценка торфяных месторождений, пригодных для комплексного освоения и производства различной продукции // *Природопользование*. 2016. № 30. С. 96–105.
10. Яблонев А.Л., Пухова О.В. Современные направления использования торфа // *Вестник Тверского государственного технического университета*. 2010. № 17. С. 104–107.
11. 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.
12. Алпеева Е.А., Гончаров М.С. Торфяная промышленность Российской Федерации. Проблемы и перспективы // *Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии*. 2021. № 3. С. 121–130.
13. Панов В.В., Мисников О.С. Тенденции развития торфяной отрасли России // *Горный журнал*. 2015. № 7. С. 108–112.
14. Воскобойник М.П. Прогноз добычи торфа в условиях инновационного развития экономики России // *Горная промышленность*. 2015. № 4 (122). С. 22.
15. 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.
16. Нагорнов Д.О. Технологии добычи торфяного сырья в СЗФО // *Высшая школа*. 2015. № 9. С. 63–66.
17. Мисников О.С., Копенкина Л.В. Возникновение торфяного дела в России // *Горный журнал*. 2020. № 2. С. 95–99.
18. Гревцев Н.В., Тяботов И.А., Олейникова Л.Н. Перспективы использования формованных субстратов в растениеводстве // *Агрородовольственная политика России*. 2017. № 2 (62). С. 57–60.
19. Фомин К.В. Моделирование нагрузок на рабочем органе торфяного фрезерующего агрегата с учетом погрешности расстановки режущих элементов // *Горные науки и технологии*. 2022. Т. 7. № 2. С. 161–169.
20. Яблонев А.Л., Жуков Н.М. Расчет момента сопротивления фрезерованию торфяной залежи при попадании фрезы на пень и определение активной ширины рабочего органа // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2021. № 2 (10). С. 51–61.
21. Яблонев А.Л. Цифровое тензометрирование при лабораторном исследовании процесса фрезерования торфяной залежи // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2018. № 1. С. 182–189.
22. Пухова О.В. Оценка влияния технологических параметров на полевую сушку торфяного слоя при его добыче // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2023. № 3 (19). С. 53–61.
23. Юсов Д.С., Иванова П.В., Иванов С.Л. Систематизация рабочих органов машин глубокого фрезерования // *Горная промышленность*. 2024. № 3. С. 85–89.

24. Fomin K.V. Method for Estimating the Spectrum Density of the Resistance Moment on the Working Body of a Peat Milling Unit // *Journal of Mining Institute*. 2020. V. 241. P. 58–67.

25. Фомин К.В. Расчет взаимных спектральных плотностей моментов сопротивления на рабочих органах торфяного фрезерующего агрегата // *Записки Горного института*. 2021. Т. 251. С. 745–756.

Для цитирования: Шахматов К.Л., Пухова О.В., Женихов К.Ю. Влияние вида фрезерующего агрегата на качественные показатели торфа для производства грунтов // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2024. № 4 (24). С. 58–67.

INFLUENCE OF THE TYPE OF MILLING UNIT ON THE QUALITY INDICATORS OF PEAT FOR SOIL PRODUCTION

K.L. SHAKHMATOV, Cand. Sc., O.V. PUKHOVA, Cand. Sc.,
K.Yu. ZHENIKHOV, Senior Lecturer

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

The article discusses the selection of a milling unit for peat extraction in order to produce soils with the lowest cost and improved quality indicators. It is noted that in order to meet the technological conditions when performing milling, there are many designs of milling devices. It is indicated that in studies directly on the fields of production with subsequent drying and harvesting operations, the MTF-14 milling cutter, PT-09 flat cutter and FPT-09 passive milling cutter were used; the milling depth was 0.02 m. It was found that after milling on the surface of the deposit, particles of different sizes fit fairly evenly into a layer, the thickness of which was predetermined by the loosening coefficient (for the PT-09 planar cutter it was 1.7 compared with 1.4 for the MTF-14 milling cutter and the FPT-09 passive milling cutter). It was found that the fractional composition of the crumbly peat depended on the natural properties of the peat deposit, as well as on the design of the milling cutter and the milling mode. At the same time, it is heterogeneous with a large number of particles with a size of more than 5 mm, which increased the quality indicators (high water retention capacity and at the same time breathability). Based on the research, it was revealed that the drying time of peat chips depended on the percentage of fractions, which was influenced by natural and technological factors (type and type of peat, degree of decomposition, moisture content of the upper layer of the deposit, type of milling unit, operating speed). It is concluded that the use of the PT-09 planar cutter for milling deposits allows to reduce production costs and obtain peat with improved quality indicators, thereby improving the economic performance of the site.

Keywords: milling, peat, peat deposit, milling unit, milling depth, peat crumbs.

Поступила в редакцию/received: 07.10.2024; после рецензирования/revised: 22.10.2024;
принята/accepted: 23.10.2024

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ

УДК 517.938

О РЕКУРРЕНТНЫХ И ОБОБЩЕННО-РЕКУРРЕНТНЫХ РЕШЕНИЯХ НЕАВТНОМНЫХ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ

С.М. ДЗЮБА, д.ф.-м.н., И.И. ЕМЕЛЬЯНОВА, ст. препод.

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

© Дзюба С.М., Емельянова И.И., 2024

В статье приведено определение рекуррентного решения дифференциального уравнения с периодической по t правой частью $\vec{X}(x, t)$, заданной на прямом произведении $V \times R$ дифференцируемого (класса C^2) компактного многообразия V , расположенного в аффинном пространстве E над полем действительных чисел R , и множества R . Указана теорема существования таких решений. Данная теорема имеет ряд довольно важных применений. Именно для непериодических функций $t \rightarrow \vec{X}(x, t)$ введено определение обобщенно-рекуррентного решения и на основании теоремы существования рекуррентных решений установлено существование обобщенно-рекуррентных решений. Отмечено, что теорема существования обобщенно-рекуррентных решений является прямым и естественным развитием известных теорем о существовании асимптотических почти периодических и других устойчивых по Пуассону решений дифференциальных уравнений с соответствующей правой частью $\vec{X}(x, t)$.

Ключевые слова: гладкое компактное многообразие, дифференциальные уравнения, рекуррентные и обобщенно-рекуррентные решения.

DOI: 10.46573/2658-5030-2024-4-68-75

ВВЕДЕНИЕ

Еще со времен написания классической монографии [1] стало понятно, что дальнейшее развитие теории систем рано или поздно приведет к потребности трактования некоторых ее задач как задач общей теории динамических систем.

Основы общей теории динамических систем были заложены в начале XX века Дж. Биркгофом и собраны вместе в его знаменитой монографии [2]. Конечной целью этой теории «должно служить качественное определение всех возможных типов движений и взаимоотношений между этими движениями» [2, с. 194]. В настоящей работе предпринята попытка распространения некоторых положений данной теории на неавтономные уравнения.

Проиллюстрируем суть возникающей при этом проблемы.

Предположим, что V – дифференцируемое компактное многообразие размерности n в аффинном пространстве E размерности ν над полем действительных чисел R , принадлежащее классу C^2 . Обозначим через \vec{E} векторное пространство, присоединенное к E . Пусть для всех $x \in V$ в векторном пространстве $\vec{T}(x; V) \subset \vec{E}$,

касательном к V в точке x , лежит вектор $\vec{X}(x)$ и пусть отображение $\vec{X}: V \rightarrow \vec{T}(x; V)$ принадлежит классу C^1 .

Рассмотрим дифференциальное уравнение

$$\frac{d\vec{x}}{dt} = \vec{X}(x). \quad (1)$$

Так как многообразие V компактно, то непродолжаемые решения уравнения (1) порождают на V динамическую систему G . Изучая движения системы G , Биркгоф установил, что ω - и α -предельные множества любого движения этой системы всегда содержат рекуррентные движения [2, с. 204].

Предположим теперь, что для всех $x \in V$ и $t \in R$ в пространстве $\vec{T}(x; V)$ лежит вектор $\vec{X}(x, t)$, пусть отображение $\vec{X}: V \times R \rightarrow \vec{T}(x; V)$ принадлежит классу C^1 при всех $t \in R$ и является линейчатым по t на R при всех $x \in V$, т.е. на каждой компактной части $I \subset R$ при всех $x \in V$ функция $t \rightarrow \vec{X}(x, t)$ является равномерным пределом некоторой последовательности ступенчатых функций [3, с. 204].

Рассмотрим дифференциальное уравнение

$$\frac{d\vec{x}}{dt} = \vec{X}(x, t). \quad (2)$$

Если многообразие V компактно, то, действуя стандартным образом, несложно показать, что любое непродолжаемое решение $\xi(t, \xi_0, t_0)$ уравнения (2) с начальными значениями $(\xi_0, t_0) \in V \times R$ определено для всех $t \in R$ [3, с. 209; 4, с. 34].

Из всех уравнений вида (2) особое значение имеют уравнения с периодической правой частью [5, с. 99]. Таким образом, в дальнейшем (до тех пор, пока не будет оговорено противное) условимся считать, что

$$\vec{X}(x, t + 1) \equiv \vec{X}(x, t).$$

Многие свойства решений автономных уравнений, как известно, не переносятся на решения неавтономных уравнений. Так, в неавтономном случае можно говорить лишь о решениях, близких к рекуррентным в некотором подходящем смысле [6]. Вместе с тем в статье [7] достаточно полно описано взаимоотношение движений процессов, порожденных решениями уравнений вида (2) и некоторых других уравнений.

Настоящая работа посвящена дальнейшему развитию результатов, полученных в статье [7]. Именно для уравнения (2) будут введены определения рекуррентного решения и обобщенно-рекуррентного решения, а также приведены теоремы существования этих решений.

УРАВНЕНИЯ С ПЕРИОДИЧЕСКОЙ ПРАВОЙ ЧАСТЬЮ

Для простоты *везде в дальнейшем будем считать, что многообразие V компактно*. Кроме того, при исследовании рекуррентных решений *в дальнейшем мы будем интерпретировать V как полуметрическое пространство с отделимой структурой*.

Сначала зафиксируем произвольный атлас $(\Phi_s, \varphi_s)_{s \in S}$ многообразия V , где Φ_s – некоторая открытая часть пространства R^n и φ_s – гомеоморфизм Φ_s на $V_s \subset V$. При этом, поскольку V компактно, можем считать, что число S конечно.

Далее напомним, что топологическое пространство Γ называется *полуметрическим*, если топология в нем индуцирована направленным семейством полуметриков $(d_i)_{i \in I}$, где множество индексов I может иметь произвольную мощность [4, с. 456].

Напомним также, что функция $d_\gamma : \Gamma \times \Gamma \rightarrow \mathbb{R}$ называется *полуметрикой*, если она удовлетворяет следующим условиям:

(A) для всех $(p, q) \in \Gamma \times \Gamma$:

$$d_\gamma(p, q) = d_\gamma(q, p);$$

(B) для всех $p \in \Gamma$:

$$d_\gamma(p, p) = 0,$$

а случай

$$d_\gamma(p, q) = 0$$

не исключается при $q \neq p$;

(C) для всех $p \in \Gamma, q \in \Gamma$ и $r \in \Gamma$ выполнено неравенство треугольника

$$d_\gamma(p, q) \leq d_\gamma(p, r) + d_\gamma(r, q).$$

Наконец, напомним, что семейство полуметриков $(d_i)_{i \in I}$ называется *направленным*, если для любой конечной части $J \subset I$ найдется такое $k \in I$, что $d_k \geq d_j$ для всех $j \in J$. Если же для каждой пары $p \neq q$ найдется такая полуметрика d_γ , что

$$d_\gamma(p, q) > 0,$$

то будем говорить, что пространство Γ снабжено *отделимой структурой* [4, с. 456].

Заметим теперь, что многообразие V полуметризуемо как компактное топологическое пространство [4, с. 458]. Полуметрики на V определим следующим образом.

Зафиксируем некоторую точку $x \in V$, некоторую ее связную окрестность V_x и зададим непрерывную функцию $\gamma: V \rightarrow \mathbb{R}$, такую, что $\gamma(p) > 0$, если $p \in V_x$, и $\gamma(p) = 0$ в противном случае. Тогда равенство

$$d_\gamma(p, q) = |\gamma(p) - \gamma(q)|$$

дает полуметрику d_γ на V [4, с. 457].

Изменяя функцию γ , можно получать различные полуметрики d_γ . Значит, всегда можно построить семейство полуметриков $(d_i)_{i \in I_{V_x}}$, которое будет направленным. При этом всегда можно добиться того, что для двух любых точек $p \neq q$ нашлась полуметрика d_γ , для которой $d_\gamma(p, q) > 0$. Проведя эту процедуру на всех связных окрестностях V_x всех точек $x \in V$, превратим V в полуметрическое пространство с отделимой структурой, в котором топология индуцирована семейством полуметриков $(d_i)_{i \in I}$. Очевидно, что эта топология совпадает с исходной, введенной на V атласом $(\Phi_s, \varphi_s)_{s \in S}$.

Сохранив все принятые выше допущения относительно отображения \vec{X} , введем следующее определение.

Определение 1. Пусть $\varphi(t)$ – непродолжаемое решение уравнения (2). Предположим, что для каждого $\varepsilon > 0$ можно указать такое натуральное число N_ε , что для всех $t \in R$

$$d_i(\varphi(t), \varphi(t + N_\varepsilon)) < \varepsilon, i \in I.$$

Тогда будем говорить, что $\varphi(t)$ – *рекуррентное решение*.

Очевидно, что если $\varphi(t)$ – рекуррентное (в смысле определения 1) решение, то найдется такая последовательность $(N_k)_{k \in \mathbb{N}} \uparrow +\infty$ натуральных чисел, что

$$\lim_{k \rightarrow +\infty} d_i(\varphi(t + N_k), \varphi(t)) = 0, i \in I,$$

равномерно на всей оси R , и наоборот. Более того, при этом

$$\lim_{k \rightarrow +\infty} d_i(\varphi(t - N_k), \varphi(t)) = 0, i \in I,$$

равномерно на всей оси R .

Определение 1 отличается от классического определения рекуррентного решения, поэтому коротко остановимся на последнем.

Напомним, что множество $M \subset V$ называется *минимальным*, если оно непусто, замкнуто, инвариантно и не содержит ни одного собственного подмножества, обладающего тремя указанными выше свойствами. При этом любое непродолжаемое решение уравнения (1), расположенное в компактном минимальном множестве, называется *рекуррентным* [2, с. 203].

Пусть $\varphi(t)$ – некоторое непродолжаемое решение уравнения (1) и

$$K = \{\varphi(t) : t \in R\}$$

является его траекторией. Биркгоф фактически доказал, что необходимое и достаточное условие рекуррентности решения $\varphi(t)$ состоит в том, что для каждого $\varepsilon > 0$ найдется такое $T_\varepsilon > 0$, что для всех $s \in R$ дуга

$$K_{S, T_\varepsilon} = \{\varphi(t) : t \in [S, S + T_\varepsilon]\}$$

траектории K аппроксимирует всю траекторию K с точностью ε , т.е. при заданном ε и соответствующем ему T_ε для всех $s \in R$ и $\tau \in R$ найдется такое $t \in [\tau, \tau + T_\varepsilon]$, что

$$d_i(\varphi(s), \varphi(t)) < \varepsilon, i \in I \text{ [2, с. 203].}$$

В наши дни данное утверждение часто принимают за определение рекуррентного решения [8, с. 402].

Если $\varphi(t)$ – рекуррентное решение, то замыкание \overline{K} его траектории K представляет собой компактное минимальное множество. В случае неавтономного уравнения (2), как известно, траектории решений начинают пересекаться. Поэтому прямое перенесение определения рекуррентного решения на неавтономные уравнения невозможно. Однако в статье [7] было показано, что в случае уравнения (1) классическое (и, стало быть, современное) определение рекуррентного решения и определение 1 эквивалентны.

Существование рекуррентных (в смысле определения 1) решений уравнения (1.2) устанавливает следующая теорема.

Теорема 1. Пусть $\xi(t)$ – непродолжаемое решение уравнения (2). Тогда из любой последовательности натуральных чисел $(N_k)_{k \in \mathbb{N}} \uparrow +\infty$ можно выбрать такую ее подпоследовательность $(N_{k_l})_{l \in \mathbb{N}} \uparrow +\infty$, что существуют рекуррентные решения $\varphi(t)$ и $\psi(t)$, удовлетворяющие следующим условиям:

(i) равномерно на каждом отрезке $[a, b] \subset \mathbb{R}$:

$$\lim_{l \rightarrow +\infty} d_i(\xi(t + N_{k_l}), \varphi(t)) = 0, i \in I \quad (3)$$

и

$$\lim_{l \rightarrow +\infty} d_i(\xi(t - N_{k_l}), \psi(t)) = 0, i \in I; \quad (4)$$

(ii) равномерно на всей оси \mathbb{R} :

$$\lim_{l \rightarrow +\infty} d_i(\varphi(t + N_{k_{l+1}} - N_{k_l}), \varphi(t)) = 0, i \in I \quad (5)$$

и

$$\lim_{l \rightarrow +\infty} d_i(\psi(t - N_{k_{l+1}} + N_{k_l}), \psi(t)) = 0, i \in I. \quad (6)$$

Теорема 1 непосредственно следует из теоремы 2.1 работы [7], поэтому ее доказательство здесь мы не приводим.

Замечание 1. Если функция $t \rightarrow \vec{X}(x, t)$ периодична с некоторым натуральным периодом N , то, очевидно, для каждого непродолжаемого решения $\xi(t)$ уравнения (2) найдутся такие последовательность натуральных чисел $(N_{k_l})_{l \in \mathbb{N}} \uparrow +\infty$ и рекуррентные (в смысле определения 1) решения $\varphi(t)$ и $\psi(t)$, что выполнены условия уравнений (3)–(6). Более того, наряду с (3)–(6) равномерно на всей оси \mathbb{R}

$$\lim_{l \rightarrow +\infty} d_i(\varphi(t - N_{k_{l+1}} + N_{k_l}), \varphi(t)) = 0, i \in I$$

и

$$\lim_{l \rightarrow +\infty} d_i(\psi(t + N_{k_{l+1}} - N_{k_l}), \psi(t)) = 0, i \in I.$$

УРАВНЕНИЯ ОБЩЕГО ВИДА

В качестве одного из применений теоремы 1 изучим поведение решений уравнения (2) без предположения о периодичности отображения \vec{X} . Другими словами, предположим, что выполнены лишь следующие допущения:

- (a) отображение $x \rightarrow \vec{X}(x, t)$ принадлежит классу C^1 при всех $t \in \mathbb{R}$;
- (b) $t \rightarrow \vec{X}(x, t)$ – отображение, линейчатое на \mathbb{R} при всех $x \in V$.

Для простоты обозначений положим

$$\vec{X}_N(x, t) = \begin{cases} \vec{X}(x, t), & t \in (-N, N); \\ \vec{X}_N(x, t - N), & t \geq N; \\ \vec{X}_N(x, t + N), & t \leq -N, \end{cases} \quad (7)$$

где $N = 1, 2, \dots$ и $x \in V$, и, наряду с уравнением (2), введем в рассмотрение последовательность уравнений

$$\frac{\overline{dx}}{dt} = \vec{X}_N(x, t), \quad (8)$$

каждое из которых периодически по t с периодом, равным N , причем все функции \vec{X}_N принадлежат классу C^1 по x при всех $t \in R$ и являются линейчатыми по t на R при всех $x \in V$.

Многообразие V компактно, поэтому, очевидно, каждое непродолжаемое решение $\xi_N(t)$ уравнения (8) определено для всех $t \in R$. Более того, в силу уравнений (7) несложно также заметить, что в смысле замечания 1 теорема 1 справедлива для всех уравнений (8).

Определение 2. Пусть $(\varphi_{N_k}(t))_{k \in N}$ – равномерно ограниченная последовательность рекуррентных решений уравнений

$$\frac{\overline{dx}}{dt} = \vec{X}_{N_k}(x, t), \quad (9)$$

некоторым специальным образом выбранных из уравнения (8). Предположим также, что равномерно на каждом отрезке $[-T, T]$

$$\lim_{k \rightarrow +\infty} d_i(\varphi_{N_k}(t), \varphi(t)) = 0, i \in I. \quad (10)$$

Тогда мы будем говорить, что функция $t \rightarrow \varphi(t)$ – *обобщенно-рекуррентное* решение уравнения (2).

Замечание 2. То, что функция $t \rightarrow \varphi(t)$, построенная по формуле (10), является решением уравнения (2), почти очевидно. Ниже (при доказательстве теоремы 2) это будет показано строго.

Теорема 2. *Предположим, что для уравнения (2) выполнены условия (а) и (б). Тогда выражение (2) имеет по крайней мере одно обобщенно-рекуррентное решение $\varphi(t)$.*

Доказательство. Поскольку многообразие V компактно, то в силу замечания 1 для каждого $N = 1, 2, \dots$ уравнение (8) имеет рекуррентное решение $\varphi_N(t)$. Последовательность $(\varphi_N(t))_{N \in N}$ равностепенно непрерывна на каждом отрезке $[-T, T]$ [9]. Следовательно, из $(\varphi_N(t))_{N \in N}$ можно выбрать такую ее подпоследовательность $(\varphi_{N_k}(t))_{k \in N}$, что существует функция $t \rightarrow \varphi(t)$, определенная и непрерывная при $t \in R$ и равномерно на $[-T, T]$ удовлетворяющая равенству (10) (см., например, источник [4, с. 489]).

Заметим теперь, что в силу уравнений (7) для всех $(x, t) \in V \times [-T, T]$

$$\vec{X}_{N_k}(x, t) = \vec{X}(x, t)$$

всякий раз, когда $N_k > T$. Следовательно, функция φ , удовлетворяющая равенству (10), является обобщенно-рекуррентным решением уравнения (2). Этим теорема 2 доказана.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Принципиально новым результатом настоящей работы является факт установления обобщенно-рекуррентных решений.

С точки зрения системного анализа существование таких решений означает, что процессы, протекающие в неавтономных системах (ограниченном пространстве), устроены достаточно просто: любой такой процесс с любой наперед заданной степенью точности может быть аппроксимирован некоторой последовательностью рекуррентных процессов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Заде Л.А. Теория линейных систем. Метод пространства состояний / пер. с англ. В.Н. Варыгина [и др.]; под ред. Г.С. Пospelова. М.: Наука. 1970. 703 с.
2. Биркгоф Д. Динамические системы. М. – Ижевск: РХД. 1999. 408 с.
3. Бурбаки Н. Функции действительного переменного. М.: Наука. 1965. 424 с.
4. Шварц Л. Анализ: в 2 т. М.: ЕЕ Медиа. 2024. Т. 2. 534 с.
5. Хейл Д.К. Теория функционально-дифференциальных уравнений / пер. с англ. С.Н. Шиманова. М.: Мир. 1984. 421 с.
6. Cheban D.N. Asymptotically Almost Periodic Solutions of Differential Equations. New York: Hindawi Publishing Corporation. 2009. 343 с.
7. Дзюба С.М. О рекуррентных движениях периодических процессов в секвенциально компактном топологическом пространстве // *Вестник российских университетов. Математика*. 2024. Т. 29. № 146. С. 138–148.
8. Немыцкий В.В., Степанов В.В. Качественная теория дифференциальных уравнений. 4-е изд. М.: ЛЕНАНД. 2017. 552 с.
9. Dzyuba S.M. On the Interrelation of Motions of Dynamical Systems on Compact Manifolds // *Lobachevskii Journal of Mathematics*. 2023. V. 44. № 7. P. 2630–2637.

Для цитирования: Дзюба С.М., Емельянова И.И. О рекуррентных и обобщенно-рекуррентных решениях неавтономных дифференциальных уравнений // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2024. № 4 (24). С. 68–75.

ON RECURRENT AND GENERALIZED-RECURRENT SOLUTIONS OF NON-AUTONOMOUS DIFFERENTIAL EQUATIONS

S.M. DZYUBA, Dr. Sc., I.I. EMELYANOVA, Senior Lecturer

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

The article presents a definition of a recurrent solution to a differential equation with a periodic t right-hand side $\vec{X}(x, t)$, defined on the direct product of $V \times R$ a differentiable (of class C^2) compact manifold V located in an affine space E over the field of real numbers R , and a set R . A theorem on the existence of such solutions is also presented. As it turns out, this theorem has a number of rather important applications. Namely, for non-periodic functions $t \rightarrow \vec{X}(x, t)$, a definition of a generalized recurrent solution is introduced and, based on the theorem on the existence of recurrent solutions, the existence of generalized recurrent solutions is established. It is noted that the existence theorem of generalized recurrence solutions is a direct and natural development of the well-known theorems on the existence of asymptotic almost periodic and other Poisson stable solutions of differential equations with the corresponding right-hand side $\vec{X}(x, t)$.

Keywords: smooth compact manifold, differential equations, recurrent and generalized recurrent solutions.

Поступила в редакцию/received: 22.09.2024; после рецензирования/revised: 27.09.2024;
принята/accepted: 01.10.2024

УДК 658.51

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИНСТРУМЕНТОВ БЕРЕЖЛИВОГО ПРОИЗВОДСТВА И УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ

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

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

© Бурдо Г.Б., Болотов А.Н., 2024

Рассмотрена суть концептуальных понятий бережливого производства и управления качеством. Проанализированы основные ошибки в их понимании и применении. Установлено, что внедрение указанных систем целесообразно осуществлять на основе исследования процессов деятельности организации. Исследована иерархия организационно-технологических систем, показаны основные задачи, решаемые в рамках систем бережливого производства и управления качеством. Предложены инструменты бережливого производства и управления качеством, которые целесообразно использовать при обеспечении высокоэффективного машиностроительного производства. Даны предложения по перестройке структуры инженерных подразделений машиностроительных предприятий.

Ключевые слова: управление качеством, бережливое производство, процессы деятельности, системный подход, иерархия производственных машиностроительных систем.

DOI: 10.46573/2658-5030-2024-4-75-89

ВВЕДЕНИЕ

На протяжении последних пятнадцати лет в машиностроении весьма активно обсуждаются вопросы, связанные с системами бережливого производства (БП) (второе название – производственные системы) и системами управления качеством (УК). Имеется множество фирм, предлагающих услуги по внедрению таких систем на производстве. В результате на предприятиях стали создаваться соответствующие одноименные подразделения, начала разрабатываться необходимая (для отчетности, аттестации, но не для реалий производства) нормативная база. Однако в ходе представления конкретных результатов труда подразделений по организации функционирования указанных систем, а также конкретных результатов по улучшению деятельности предприятия становилось очевидно, что ожидаемые результаты не достигались.

Причина, судя по всему, заключается в системной ошибке при создании и функционировании систем БП [9–14, 16–20] и УК [1–8, 15]. Таким образом, целью настоящего исследования стало выявление методологических основ реализации данных концепций.

СУТЬ КОНЦЕПЦИЙ БЕРЕЖЛИВОГО ПРОИЗВОДСТВА И УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ И ОСНОВНЫЕ ОШИБКИ В ИХ ПОНИМАНИИ И ПРИМЕНЕНИИ

Остановимся на понимании концепции и идеологии БП и УК. На наш взгляд, при практической реализации руководители, как правило, исходили из того, что это какие-то отдельные процессы, которые каким-то образом улучшают производственные процессы предприятия. Отсюда и стремление иметь в административной структуре предприятия подразделения БП и УК с не вполне конкретными функциями.

Здесь можно выделить *первую ошибку*. Ее суть сводится к тому, что БП и УК рассматриваются как некие самостоятельные надсистемы, «надзирающие» за основным функциональным процессом (ОФП) предприятия и не всегда понимающие его (процесса) суть (напомним, что основной функциональный процесс предприятия охватывает конструкторскую подготовку производства, технологическую подготовку, планирование, изготовление изделий, выходной контроль).

По нашему мнению [5, 6, 14–20], следует говорить об элементах БП и УК, используемых при реализации ОФП предприятия, т.е. инструменты БП и УК должны использоваться в повседневной работе участниками ОФП (конструкторами, технологами, персоналом диспетчерских служб и цехового управления). Это абсолютно не противоречит реалиям производства, так как известно, что цель ОФП – выпуск продукции заданного качества (тут пригодятся инструменты УК) в заданном количестве и в заданные сроки с минимально необходимыми затратами материальных и трудовых ресурсов (инструментов БП).

Таким образом, БП и УК являются не отдельными системами предприятия, а некими функциями, реализуемыми участниками ОФП.

Основополагающие элементы БП и УК были заложены в методиках функционально-стоимостного анализа (СССР, Россия) и методиках оптимизации

деятельности фирмы «Тойота» (Япония). При этом речь всегда шла именно об инструментах, а не о неких автономных системах.

Суть *второй ошибки* состоит в том, что деятельность, связанная с БП и УК, рассматривается, как правило, лишь на этапе изготовления продукции [9, 12, 17, 18]. При этом обычно абсолютно не анализируется деятельность на этапе технической подготовки и деятельность, связанная с системой высшего управления организацией. Так, если говорить с позиций БП, то в несоизмеримо большей степени (по сравнению с ОФП) эффективность деятельности предприятия определяется тактикой продаж (нет никакого смысла в том, чтобы готовая продукция неделями находилась на складе без оплаты проделанной работы), тактикой закупок материалов, комплектующих, инструмента (есть смысл вкладывать деньги в запасы на несколько месяцев (а то и кварталов), а не закупать их под конкретный заказ). Таким образом, следует говорить о логической увязанности планов по продажам с планами выпуска, а планов выпуска – с планами закупок материалов и т.п. Разумеется, выгоднее изготавливать и продавать изделия небольшими партиями, а не копить готовые изделия, вкладывая в них трудовые и материальные ресурсы. Если оценивать действия системы управления организацией с точки зрения концепции УК, то ее функция – задание требуемого уровня качества изделия, который обеспечивается при выполнении ОФП. При этом неправильные действия в данной области приведут либо к излишним затратам (завышенному уровню качества), либо к отсутствию спроса на продукцию (при заниженном уровне качества). Трудность здесь состоит в том, что уровень качества должен задаваться с точки зрения потребителя продукции.

Инструменты БП и УК нужно использовать во всех процессах деятельности организации, причем необходимо осознавать и применять на практике их взаимосвязи и взаимовлияние.

Третья ошибка, на наш взгляд, состоит в том, что при анализе технических решений их не рассматривают комплексно, всесторонне, без взаимосвязи и взаимовлияния. К примеру, желание сократить процессы перемещения изделий и межоперационного пролеживания может привести к формированию специализированных технологических линий, однако при этом вырастет потребность в том или ином количестве станков и рабочих.

Желание закрепить рабочих на определенном рабочем месте противоречит идеям бригадного подряда. Рабочий – это не придаток оборудования, а управляющий им. Оборудование и рабочие места способствуют развитию у работника соответствующих навыков, что позволяет закрывать возникающие «узкие места» в производстве.

Какие-либо мероприятия в рамках БП для конкретных изделий нецелесообразно рассматривать в отрыве от других, учитывая общность технологической системы, в которой реализуются технологические процессы.

Если говорить о системе БП, надо принимать во внимание ее деятельность в рамках всех процессов. Например, непроизводительные потери времени при информационных обменах увеличат технологический цикл изготовления продукции, станут причиной продления сроков конструкторской подготовки и т.д.

Ведя речь об УК, нельзя говорить о нем без привязки к конкретным изделиям. Следует рассматривать процедуры УК, начиная с конструкторской подготовки и заканчивая процессами контроля и испытаний [5].

Говоря о реализации каких-либо мероприятий в рамках БП и УК, необходимо анализировать их результаты не только для рассматриваемого изделия (заказа), но и для другой продукции, которая выпускается на данном предприятии.

Четвертая ошибка связана с тем, что подходы к использованию элементов БП и УК рассматриваются независимо от целевой функции конкретного заказа. На самом же деле различные целевые функции свидетельствуют о необходимости расставлять приоритеты в отношении экономии ресурсов (например, целевой функции «минимум длительности технологического цикла» будет соответствовать приоритетное сокращение времени (или станкочасов) на операцию и времени пролеживания деталей между операциями, но никак не уменьшение материальных, трудовых или денежных затрат).

Таким образом, можно говорить о неких комплексных (т.е. интегрированно учитывающих все стороны результативности мероприятий по УК и БП) модифицируемых (в зависимости от целевой функции заказа) критериях результативности мероприятий по БП и УК.

Рассмотрим методику реализации инструментов БП и УК в машиностроительных организационно-технологических системах.

ИССЛЕДОВАНИЕ И ВЫЯВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОВ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ПРЕДПРИЯТИЯ

Выявление процессов деятельности организации необходимо для установления их иерархии и определения точек процесса, где происходит оценка эффективности мероприятий по БП и обеспечению качества продукции заданного уровня [9–12; 17–20].

В первую очередь определим, что мы будем понимать под структурой производственного процесса. В качестве системного объекта структуру производственного процесса можно определить следующим образом:

$$PP = \{F, K, I, S, T\},$$

где F – основная функция производственного процесса, являющаяся логическим объединением частных функций f_j каждого процесса, $F = \bigvee_1^K f_j$; K – число процессов в производственном процессе; I – иерархия процессов; S – функциональные связи между процессами (функциональная структура); T – временные связи между процессами (временная структура).

Следует иметь в виду, что процессы не ограничиваются рамками одного структурного подразделения [12]. Очевидно, структуру производственного процесса следует строить, начиная с ОФП. Как мы определили выше, ОФП (процесс первого уровня иерархии) включает процессы технической подготовки производства (процессы конструкторской, технологической и организационной подготовки) и технологические процессы по выпуску и испытаниям продукции.

Данный процесс определяет временной параметр и вспомогательные процессы, сопровождающие ОФП. Таковыми являются процессы финансового обеспечения, материального обеспечения, кадрового обеспечения, организационного обеспечения. Они необходимы для реализации ОФП и функционально с ним связаны. Это процессы второго уровня иерархии.

Процессы второго уровня также определяют процессы третьего уровня иерархии, функционально связанные с ними и необходимые для их реализации.

Например, для реализации технологических процессов необходимо иметь соответствующие материалы и полуфабрикаты (процессы материально-технического обеспечения, второй уровень иерархии). Для их реализации следует предусмотреть определенные финансовые резервы, своевременно произвести оплату, т.е. осуществить процессы третьего уровня. Глубина расчленения процессов определяется возможностью управления ими в рамках конкретной организации.

Процессы каждого уровня необходимо разделить на операции, т.е. определить степень детализации процессов в пределах каждого уровня. Рекомендуется такое разбиение производить на основе возможности оценки промежуточных результатов и смысловой завершенности операции. Например, с точки зрения БП и УК степень дифференциации нужно соблюдать, отталкиваясь от возможности оценки влияния промежуточного результата на конечный результат процесса.

Представление всей деятельности предприятия в виде процессов способствует созданию их иерархической структуры и образованию временных связей (рисунок).

Все процессы, реализуемые на предприятии, должны подлежать управлению.

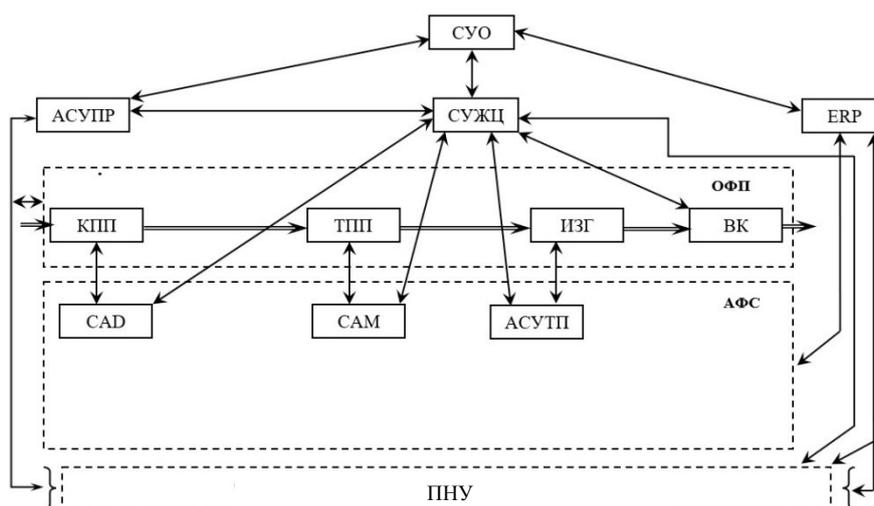
Основной функциональный процесс включает следующие основные этапы: конструкторскую подготовку производства (КПП); технологическую подготовку производства (ТПП); изготовление продукции (ИЗГ); выходной контроль (ВК).

Система управления организацией (СУО) определяет способы и методы реализации всех видов действий, осуществляемых в организации.

Автоматизированная система управления процессами (АСУПР) имеет прямые и обратные информационные связи с СУО и непосредственно управляет основными и вспомогательными процессами.

Автоматизированная система управления процессами имеет информационные связи с системой управления жизненным циклом (СУЖЦ) изделия.

Система управления жизненным циклом изделия осуществляет аккумуляцию и распределение информации между пользователями (СУО; основным функциональным процессом; процессами низших уровней (ПНУ); основными автоматизированными функциональными системами (АФС): САД (конструкторской подготовкой производства); САМ (технологической подготовкой производства), АСУТП (управлением технологическими процессами); АСУПР, ERP-системой). Основные автоматизированные функциональные системы обеспечивают автоматизацию инженерной деятельности в рамках ОФП, непосредственно встроены в ОФП. ERP-системы обслуживают основные и вспомогательные производственные процессы машиностроительного производства и обмениваются информацией с САД, САМ и АСУТП через СУЖЦ.



Функциональные процессы предприятия и организация обмена информацией

Рассмотрим способ представления процессов в виде операций. Конструкторскую подготовку производства целесообразно представить в виде следующих операций,

отражающих принятую в машиностроении последовательность действий: технического задания, НИР (при необходимости), технического предложения, эскизного проекта, технического проекта, рабочей документации.

Технологическую подготовку производства целесообразно представить в виде следующих операций: ознакомления с конструкторской документацией на изделие и определения типа производства, анализа технологичности конструкции изделия с точки зрения сборки, определения методов обеспечения точности при сборке, разработки технологической схемы сборки, проектирования сборочных операций, закрепления сборочных операций за рабочими местами – маршрутизации (проектирования участков сборки), ознакомления с рабочими чертежами деталей, анализа технологичности конструкции каждой детали с точки зрения механической обработки, проектирования маршрутной технологии изготовления каждой детали, разработки операционной технологии каждой детали, разработки управляющих программ, привязки операций к рабочим местам – маршрутизации (проектирования участка механической обработки). Процесс изготовления может быть представлен следующими операциями: календарным планированием, оперативным планированием, собственно изготовлением и диспетчированием.

Смысл подобного представления процессов в виде операций состоит в том, что после выполнения каждой из них проектировщик (конструктор, технолог, цеховой управленческий персонал) или группа проектировщиков (при сложных задачах) оценивает(ют) полученные решения с точки зрения обеспечения качества изделия и достаточности реализованных инструментов БП.

Общее руководство такой оценкой следует возложить на руководителя функционального подразделения, ответственного за выполнение операции ОФП.

УРОВНИ ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Состав уровней

Ранее мы говорили, что вопросы, связанные с БП и УК, необходимо рассматривать не только на этапе изготовления. С этой целью охарактеризуем уровни организационно-технической системы (ОТС), от деятельности на которых зависит эффективность работы предприятия, а также качество продукции:

I уровень – уровень управления и настройки процессов деятельности организации (реализует высшее управленческое звено предприятия).

II уровень – уровень разработки технических решений (проектно-технологический уровень, реализуют инженерно-технические работники (ИТР), выполняющие КПП и ТПП).

III уровень – уровень изготовления изделий (производственный, реализуется цеховым персоналом).

Указанное представление позволит более четко разграничить инструменты БП и УК, используемые на каждом из уровней.

Функции, реализуемые на уровнях ОТС

На уровне управления и настройки процессов деятельности организации выполняются следующие основные функции (с точки зрения рассматриваемой нами проблематики):

- определение заданий по номенклатуре выпускаемых изделий;
- установление заданий по срокам выпуска изделий;
- определение стратегий продаж изделий по номенклатуре и срокам;
- определение стратегии закупок материалов, комплектующих, изнашиваемого инструмента, оснастки и т.п.;
- формирование критериев качества выпускаемых изделий;

определение допустимого уровня незавершенного производства;
управление процессами организации.

На проектно-технологическом уровне реализуются следующие основные функции:
разработка проекта изделия требуемого качества при допустимом уровне затрат на его изготовление;

разработка технологических процессов изготовления изделия, обеспечивающих его заданное качество;

оптимизация конструкций и технологий в целях сокращения трудовых, материальных и финансовых затрат при обеспечении заданного уровня качества;

определение потребных производственных мощностей;

маршрутизация технологических операций по рабочим местам с учетом загрузки оборудования и минимизации внутрицеховых и внутризаводских перемещений;

организация рабочих мест станочников, сборщиков;

выбор подъемно-транспортных средств и средств механизации и автоматизации технологических операций.

На производственном уровне реализуются следующие наиболее важные функции:

определение календарных планов выпуска продукции в соответствии с установленными сроками выпуска на основе стратегии продаж;

обеспечение качества изделий на этапе производства;

определение потребности в трудовых ресурсах;

обеспечение необходимых производственных мощностей;

обеспечение работоспособности парка оборудования;

разработка календарных планов (графиков) и диспетчирование;

обеспечение плана выпуска по номенклатуре и срокам;

обеспечение минимизации суммарного пути перемещения изготавливаемых объектов;

обеспечение надлежащего уровня организации труда на рабочих местах.

РЕСУРСЫ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ ПРОЕКТА ПО ВЫПУСКУ ИЗДЕЛИЯ

Ресурсы, необходимые для реализации проекта по выпуску изделия и определяющие эффективность производства с точки зрения качества и идеологии БП (по сути, объекты управления в укрупненном виде), можно разделить на пять групп:

1. Трудовые (людские). Определяются количеством человеко-часов, необходимых для реализации основного функционального процесса.

2. Производственные (оборудование, площади). Определяют производственные мощности.

3. Материальные (материалы, полуфабрикаты, покупные комплектующие, изнашиваемые орудия труда).

4. Интеллектуальные (квалификация проектировщиков, задействованных в ОФП, и управленческо-административного персонала, компьютерные системы автоматизации и интеллектуализации труда).

5. Финансовые. Включают два вида ресурсов, которые необходимы для реализации проекта:

а) заработную плату участников проекта;

б) доступные денежные средства, которые можно обменять на ресурсы видов 1–4.

Между уровнями организационно-технической системы имеется определенное разделение зон ответственности по управлению ресурсами, которое можно представить способом, изложенным чуть ниже.

ОТВЕТСТВЕННОСТЬ ЗА УПРАВЛЕНИЕ РЕСУРСАМИ И ИНСТРУМЕНТЫ БП И УК

К уровню управления и настройки процессов деятельности организации относятся:

определение стратегии продаж (разбивка изделий по номенклатуре, количеству и срокам продаж);

утверждение объемных и календарных планов по выпуску изделий в соответствии со стратегией продаж;

определение стратегии закупок материалов, комплектующих и т.п.;

обеспечение заработной платы;

обеспечение деятельности трудовыми, производственными, финансовыми и интеллектуальными ресурсами;

обеспечение производственных мощностей;

утверждение параметров качества изделия (техническое задание).

Рассмотрим, каким образом на данном уровне можно добиться экономии ресурсов различных видов. Для удобства сведем мероприятия в табл. 1.

Таблица 1. Инструменты БП и УК на уровне управления

Мероприятие	Инструменты БП и УК	Виды экономии ресурсов
Определение рациональной стратегии продаж	Уменьшение объема готовой продукции на складах	1. Уменьшение оборотных средств. 2. Уменьшение незавершенного производства
Обеспечение стратегии закупок материалов, комплектующих в соответствии с планами продаж	Уменьшение запасов материалов, комплектующих и т.п.	Уменьшение оборотных средств (финансовые ресурсы)
Обеспечение объемных и календарных планов по выпуску изделий в соответствии со стратегией продаж	Уменьшение объема готовой продукции на складах	1. Уменьшение оборотных средств (финансовые ресурсы). 2. Уменьшение незавершенного производства (финансовые, трудовые и материальные ресурсы)
Обеспечение интеллектуальных ресурсов	1. Подбор и рациональная расстановка кадров управленческого звена. 2. Обеспечение деятельности программными продуктами	1. Повышение качества принимаемых управленческих решений (см. п. 1–3, 5). 2. Сокращение сроков выработки управленческих решений (см. п. 1–3, 5)
Обеспечение требуемых параметров качества изделия в техническом задании	Обеспечение технически обоснованного качества изделия	1. Обеспечение хороших продаж изделия при определенной ценовой политике (выручка). 2. Отсутствие избыточной трудоемкости и себестоимости изделия (трудовые, материальные, производственные финансовые ресурсы). 3. Отсутствие избыточных трудовых ресурсов

К уровню разработки технических решений относятся:

- проектирование изделия в соответствии с параметрами ее качества, которые отражены в техническом задании;
- анализ соответствия норм точности на изделие его служебному назначению;
- разработка технологических процессов механической обработки и сборки, надежно обеспечивающих заданные чертежами технические требования;
- оптимизация конструкций и технологий;
- определение последовательности перемещения деталей и сборочных единиц по рабочим местам;
- рациональная организация рабочих мест, оснащение их средствами автоматизации и механизации;
- подбор грамотных ИТР и повышение их квалификации; оснащение рабочих мест ИТР средствами автоматизации и интеллектуализации труда.

Рассмотрим, каким образом на данном уровне можно добиться экономии ресурсов различных видов. Для удобства сведем мероприятия в табл. 2.

Таблица 2. Инструменты БП и УК на уровне разработки технических решений

Мероприятие	Инструменты БП и УК	Виды экономии ресурсов
Обеспечение конструкции изделия в соответствии с параметрами ее качества, отраженными в техническом задании	<ol style="list-style-type: none"> 1. Обеспечение технически обоснованного качества изделия. 2. Конструкторский надзор при изготовлении 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Обеспечение доходов от хороших продаж изделия при определенной ценовой политике (выручки). 2. Отсутствие избыточной трудоемкости и себестоимости изделия (трудовые, материальные, производственные и финансовые ресурсы). 3. Отсутствие избыточных трудовых ресурсов
Оптимизация конструкции изделия	<p>Обоснование параметров точности изделия, применяемых материалов, уровня технологичности</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Предотвращение избыточной трудоемкости изготовления. 2. Предотвращение необоснованного выбора материалов (материальные и финансовые ресурсы). 3. Обеспечение технологичности (уменьшение трудовых, финансовых и материальных затрат на этапах жизненного цикла изделия)

Мероприятие	Инструменты БП и УК	Виды экономии ресурсов
Обеспечение грамотной разработки технологических решений	<ol style="list-style-type: none"> 1. Обеспечение надежности (по качеству) технологических процессов сборки и механической обработки. 2. Технологический надзор при изготовлении. 3. Управление точностью обработки 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Уменьшение потерь по браку (трудовые, материальные, финансовые). 2. Уменьшение количества потребных трудовых и производственных ресурсов. 3. Сокращение технологических циклов – уменьшение объемов незавершенного производства (трудовые, материальные, производственные и финансовые ресурсы). 4. Сокращение материалоемкости изделия за счет рационального определения размеров заготовки (трудовые, материальные и финансовые ресурсы)
Определение последовательности перемещения деталей и сборочных единиц по рабочим местам	<ol style="list-style-type: none"> 1. Анализ длины маршрутов перемещения деталей и изделий. 2. Анализ производственных мощностей 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Сокращение суммарного времени перемещения деталей и изделий (сокращение незавершенного производства). 2. Сокращение длительности технологических циклов (сокращение незавершенного производства). 3. Сокращение производственных ресурсов
Обеспечение рациональной организации рабочих мест, оснащение их средствами автоматизации и механизации	<ol style="list-style-type: none"> 1. Специализация рабочих мест путем закрепления за ними определенных деталей-операций для минимизации времени переналадки. 2. Оснащение рабочих мест необходимым инструментом. 3. Обеспечение комфортности на рабочем месте. 4. Автоматизация и механизация работ 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Уменьшение суммарной трудоемкости и себестоимости изготовления (трудовые, производственные и финансовые ресурсы). 2. Уменьшение потребности в трудовых ресурсах
Обеспечение профессионализма работников, оснащение средствами интеллектуализации и автоматизации инженерного труда	<ol style="list-style-type: none"> 1. Постоянное повышение квалификации ИТР. 2. Обучение работе с современными программными продуктами и их внедрение 	Повышение качества и сокращение сроков выработки технических решений (п. 1–5 раздела «Ресурсы для реализации проекта по выпуску изделия»)

На производственном уровне отвечают за обеспечение:

- а) фактических календарных планов выпуска продукции в соответствии с расчетными планами по номенклатуре и срокам;
- б) потребных производственных мощностей;
- в) потребности в трудовых ресурсах;
- г) работоспособности парка оборудования;
- д) минимизации суммарного пути перемещения изготавливаемых объектов;
- е) надлежащего уровня организации труда на рабочих местах;
- ж) квалифицированными кадрами и средствами автоматизации и интеллектуализации инженерного труда;
- з) качества изделий на этапе производства.

В табл. 3 приведем инструменты БП и УК, позволяющие сокращать все виды затрат на этапе производства.

Таблица 3. Инструменты БП и УК на производственном уровне

Мероприятие	Инструменты БП и УК	Виды экономии ресурсов
Обеспечение фактических календарных планов выпуска продукции в соответствии с расчетными планами по номенклатуре и срокам	<ol style="list-style-type: none"> 1. Управление длительностью технологических циклов. 2. Определение последовательностей прохождения деталей по операциям на основе приоритетных схем. 3. Диспетчирование технологических процессов 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Обеспечение отсутствия избыточных запасов готовой продукции (материальные, финансовые, производственные и трудовые ресурсы). 2. Обеспечение отсутствия избыточных производственных ресурсов. 3. Увеличение загрузки рабочих мест (трудовые и финансовые ресурсы)
Обеспечение производственных мощностей	<ol style="list-style-type: none"> 1. Расчеты производственных мощностей. 2. Реализация системы планово-предупредительного ремонта оборудования 	Предотвращение избыточных производственных мощностей
Обеспечение потребности в трудовых ресурсах	Расчеты трудоемкостей технологических операций	Обоснованное определение численности рабочих (трудовые ресурсы)
Обеспечение минимизации суммарного пути перемещения изготавливаемых объектов	<ol style="list-style-type: none"> 1. Анализ длины маршрутов перемещения деталей и изделий. 2. Анализ производственных мощностей 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Сокращение суммарного времени перемещения деталей и изделий (сокращение незавершенного производства). 2. Сокращение длительности технологических циклов (сокращение незавершенного производства)

Мероприятие	Инструменты БП и УК	Виды экономии ресурсов
Обеспечение рациональной организации рабочих мест, оснащение их средствами автоматизации и механизации	<ol style="list-style-type: none"> 1. Специализация рабочих мест путем закрепления за ними определенных деталей-операций для минимизации времени переналадок. 2. Оснащение рабочих мест необходимым измерительным, вспомогательным и режущим инструментом. 3. Обеспечение комфортности на рабочем месте. 4. Автоматизация и механизация работ на рабочих местах 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Уменьшение суммарной трудоемкости и себестоимости изготовления (трудовые, производственные и финансовые ресурсы). 2. Уменьшение потребности в трудовых ресурсах
Обеспечение профессионализма работников, оснащение средствами интеллектуализации и автоматизации инженерного труда	<ol style="list-style-type: none"> 1. Постоянное повышение квалификации ИТР и рабочих. 2. Обучение ИТР работе с современными программными продуктами и их внедрение. 	Повышение качества и сокращение сроков выработки технических решений (п. 1–5 раздела «Ресурсы для реализации проекта по выпуску изделия»)
Обеспечение качества изделий на этапе производства	<ol style="list-style-type: none"> 1. Помощь в организации конструкторского надзора и контроля за соблюдением технологической дисциплины. 2. Обеспечение входного и выходного контроля. 3. Организация работ по выявлению причин брака 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Изготовление продукции в соответствии с техническими требованиями. 2. Уменьшение брака (материальные, финансовые и трудовые ресурсы)

Таким образом, можно увидеть, что инструменты БП логично вписываются в функциональные действия исполнителей ОФП.

ПОДРАЗДЕЛЕНИЯ БЕРЕЖЛИВОГО ПРОИЗВОДСТВА И УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ: КАК БЫТЬ?

Возникает резонный вопрос: что делать с БП и УК, имеющимися на предприятии с административными структурами?

В этой связи следует напомнить, что реальные результаты зависят не от наличия определенных административных структур предприятий, а от того, насколько качественно отрабатываются функциональные обязанности участников ОФП.

Наиболее просто, на наш взгляд, обстоит дело с представителями подразделения БП. Штат нужно сократить, после чего сотрудников следует перевести в отдел технического обучения, наделив их функциями повышения квалификации и пропаганды знаний (среди ИТР и рабочих) в области ресурсосберегающих технологий, методов работы, организации труда и т.д. (т.е. в тех областях, которые направлены на сокращение всех видов затрат).

Функции по использованию инструментов БП следует прописать в должностных обязанностях участников ОФП.

С подразделением по УК вопрос представляется более сложным, так как требуется наличие определенной документации, отражающей суть процедур по управлению качеством продукции. На наш взгляд, такую документацию могла бы подготовить группа, административно и функционально подчиненная руководителю ОФП, желательна состоящая из работников конструкторских, технологических и производственных подразделений. Группа должна заниматься разработкой и описанием реально работающих процедур (от проектирования до испытания изделия) в рамках ОФП.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Настоящая статья носит полемический и отчасти спорный характер, поэтому необходимо остановиться на некоторых соображениях.

Вышеприведенное представление процедур сбережения ресурсов и обеспечения качества продукции логично вписывается в функциональную структуру процессов деятельности организации и не «разрывает» одну функцию между несколькими исполнителями. Благодаря этому не происходит дублирования действий и назначения нескольких ответственных за тот либо иной результат деятельности, т.е. соблюдается принцип «кто принимает решение, тот и отвечает».

Кроме того, одно из важных соображений – придание большей значимости кадровой политике в организации, т.е. подбору, непрерывному обучению и расстановке инженерных и рабочих кадров на всех уровнях процессов деятельности организации. Кадры – важнейший ресурс организации.

Немаловажным является и готовность руководства организации изменять функциональные процессы (и административную структуру) предприятия. Важнейшая задача руководства организации – увязка по времени всех функциональных процессов компании.

Очевидно, что подобную реконструкцию процессов управления качеством и ресурсосбережения нельзя выполнить сразу. На это требуется время, а также подготовка кадров, но, на наш взгляд, конечный результат может быть весьма эффективным.

ЛИТЕРАТУРА

1. Singh J., Ahuja I.P.S., Singh H., Singh A. Development and Implementation of Autonomous Quality Management System (AQMS) in an Automotive Manufacturing Using Quality 4.0 Concept – a case Study // *Computers & Industrial Engineering*. 2022. V. 168. P. 108121.
2. Powell D., Eleftheriadis R., Myklebust O. Digitally Enhanced Quality Management for Zero Defect Manufacturing // *Procedia CIRP*. 2021. V. 104. P. 1351–1354.
3. Burdo G., Bolotov A. Establishment of Criteria for Assessing Preproduction Engineering in CAD TP // *VI International Conference on Information Technologies in Engineering Education (Inforino)*. IEEE. 2022. P. 1–4.
4. Zhu V., Giddaluru M.P., Elsoury M., Gao J. An Approach to Determining the Need for Integrating Quality Management into Industrial PLM Implementation // *Procedia CIRP*. 2022. V. 109. P. 490–495.
5. Filz M.A., Gellrich S., Lang F., Zietsch J., Abraham T., Herrmann C. Data-driven Analysis of Product Property Propagation to Support Process-integrated Quality Management in Manufacturing Systems // *Procedia CIRP*. 2021. V. 104. P. 900–905.

6. Burdo G. Basic Approaches to Creating Automated Design and Control Systems in a Machine-Building Industry // *International Conference on Intelligent Information Technologies for Industry*. 2019. P. 281–288.
7. Lester A. Project Management, Planning and Control. Managing Engineering, Construction and Manufacturing Projects to PMI, APM and BSI Standards. Elsevier Ltd. 2021. 696 p.
8. Elafri N., Tappert J., Rose B., Yassine M. Lean 4.0: Synergies between Lean Management Tools and Industry 4.0 Technologies // *IFAC-PapersOnLine*. 2022. V. 55. № 10. P. 2060–2066.
9. Psarommatis F., Azamfirei V. Customized Quality Inspection Cycles for Achieving Sustainable Manufacturing in the Era of Zero Defect Manufacturing // *Procedia CIRP*. 2023. V. 120. P. 141–146.
10. Leygonie R., Motamedi A., Iordanova I. Development of Quality Improvement Procedures and Tools for Facility Management BIM // *Developments in the Built Environment*. 2022. V. 11. P. 100075.
11. Tasia K.A. Integrated Quality, Maintenance and Production Model for Multivariate Processes: A Bayesian Approach // *Journal of Manufacturing Systems*. 2022. V. 63. P. 35–51.
12. Bokhorst J.A.C., Knol W., Slomp J., Bortolotti T. Assessing to What Extent Smart Manufacturing Builds on Lean Principles // *International Journal of Production Economics*. 2022. V. 253. P. 108599.
13. Tortorella G.L., Narayanamurthy G., Thurer M. Identifying Pathways to a High-performing Lean Automation Implementation: An Empirical Study in the Manufacturing Industry // *International Journal of Production Economics*. 2021. V. 231. P. 107918.
14. Burdo G. Automated Quality Management System in Mechanical Engineering // *International Conference on Intelligent Information Technologies for Industry*. 2018. P. 218–224.
15. Marinelli M., Deshmukh A.A., Janardhanan M., Nielsen I. Lean Manufacturing and Industry 4.0 Combinative Application: Practices and Perceived Benefits // *IFAC-PapersOnLine*. 2021. V. 54. № 1. P. 288–293.
16. Dillinger F., Kagerer M., Reinhart G. Concept for the Development of a Lean 4.0 Reference Implementation Strategy for Manufacturing Companies // *Procedia CIRP*. 2021. V. 104. P. 330–335.
17. Ortega I.U., Amrani A.Z., Vallespir B. Modeling: Integration of Lean and Technologies of Industry 4.0 for Enterprise Performance // *IFAC-PapersOnLine*. 2022. V. 55. № 10. P. 2067–2072.
18. Reke E., Powell D., Mogos M.F. Applying the Fundamentals of TPS to Realize a Resilient and Responsive Manufacturing System // *Procedia CIRP*. 2022. V. 107. P. 1221–1225.
19. Langlotz P., Aurich J.C. Causal and Temporal Relationships within the Combination of Lean Production Systems and Industry 4.0 // *Procedia CIRP*. 2021. V. 96. P. 236–241.
20. Dillinger F., Tropschuh B., Dervis M.Y., Reinhart G. A Systematic Approach to Identify the Interdependencies of Lean Production and Industry 4.0 Elements // *Procedia CIRP*. 2022. V. 112. P. 85–90.

Для цитирования: Бурдо Г.Б., Болотов А.Н. Повышение эффективности инструментов бережливого производства и управления качеством // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2024. № 4 (24). С. 75–89.

IMPROVING THE EFFICIENCY OF LEAN MANUFACTURING AND QUALITY MANAGEMENT TOOLS

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

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

The essence of the conceptual concepts of lean manufacturing and quality management is considered. The main errors in their understanding and application are analyzed. It has been established that it is advisable to implement these systems based on the study of the organization's business processes. The hierarchy of organizational and technological systems is investigated, the main tasks solved within the framework of lean production and quality management systems are shown. The tools of lean manufacturing and quality management are proposed, which are advisable to use in ensuring highly efficient machine-building production. Proposals for restructuring the structure of engineering departments of machine-building enterprises are given.

Keywords: machine-building production, quality management, lean manufacturing, business processes, system approach, hierarchy of production machine-building systems.

Поступила в редакцию/received: 22.06.2024; после рецензирования/ revised: 27.06.2024;
принята/accepted: 01.07.2024

УДК 658.512

РОДОВИДОВЫЕ ОТНОШЕНИЯ КАК ОПОРНАЯ СТРУКТУРА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ МАШИНОСТРОЕНИЯ

Е.В. ПОЛЕТАЕВА, канд. техн. наук, И.В. ГОРЛОВ, д-р техн. наук

Тверской государственный технический университет
170026, Тверь, наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: epolet2010@mail.ru

© Полетаева Е.В., Горлов И.В., 2024

Статья посвящена вопросам, связанным с разработкой моделей объектов и процессов, являющихся частью технологической подготовки производства, в области автоматизированного проектирования технологических процессов изготовления деталей. Рассмотрены концептуальные объекты и структурные связи между этими объектами. Особое внимание уделено терминам «материальный объект» и «родовидовые отношения». Показано, какую роль они играют в системе знаний предметной области машиностроения. Приведен пример кодировки элементов машиностроительной производственной системы и связей средствами структурного моделирования. Изучены вопросы, связанные с созданием алгоритмов, осуществляющих обработку закодированной информации, для решения задач выбора элементов производственной системы на разных уровнях абстрагирования. Приведен пример решения инженерной задачи на основе структуры терминологической системы онтологии машиностроения.

Ключевые слова: машиностроение, автоматизация проектирования, технологическая подготовка производства, онтология, структурное моделирование, терминологическая система, ИПИ-технологии, базы знаний.

DOI: 10.46573/2658-5030-2024-4-89-95

ВВЕДЕНИЕ

Информационная поддержка жизненного цикла изделия (ИПИ-технологии) базируется на автоматизированной информационной системе, состоящей из двух основных компонентов: онтологии предметной области и обработчика (пакета прикладных программ, осуществляющих операции по решению задач инженерного проектирования). Задачи, решаемые обработчиком в области машиностроения, включают в себя поиск информации; оптимизацию выбора технологического оборудования и его элементов, режимов работы оборудования, выбора методов технологической обработки и сборки; построение оптимальной структуры технического объекта или технологического процесса и др. Для решения поставленных задач система должна содержать данные (знания) о производстве в целом, его подсистемах и элементах. Онтология и обработчик тесно взаимосвязаны: структура онтологии определяет возможности обработчика. С одной стороны, модели знаний, составляющие основу онтологий, представляют собой математические конструкции, пригодные для использования обработчиком, осуществляющим выводы новых знаний с использованием аппарата формальной логики [1]. С другой стороны, онтология отражает структуру предметной области, в основе которой лежит концептуальная модель – ее формализованное представление. Проблема формализации заключается в том, что машиностроительные производственные системы являются системами сложными, включающими множество разнородных объектов и связей между ними. Источником знаний в таких системах выступают модели, основанные на научных концептах, которые должны быть формализованы и интегрированы в информационную систему. В существующих системах автоматизированного проектирования технологических процессов из-за недостатков используемых алгоритмов нет прямой связи между описанием детали и получаемым маршрутом обработки детали, что в большинстве случаев требует вмешательства технолога [2]. Это может приводить к снижению качества проектирования и возникновению потребности в высокой квалификации оператора. Решить данную проблему можно на основе терминологического подхода при разработке информационных систем технологической подготовки производства.

ТЕРМИНОЛОГИЧЕСКАЯ СИСТЕМА КАК ОСНОВА ОНТОЛОГИИ

Основу онтологии предметной области «Машиностроение» составляет терминологическая система [3–5], представляющая собой множество терминов (T), которое включает несколько подмножеств: термины вещественных объектов (T_v), термины процессов (T_p) и термины свойств (T_s). Такое разделение множества терминов диктуется семантикой предметной области и упрощает создание математического аппарата обработчика. Рассмотрим отношения только между объектами, входящими в одно из подмножеств, например вещественными. Качественные свойства вещественных объектов определяются положением соответствующих терминов в терминологической системе в виде родовидовых связей. Такая связь позволяет использовать логику, где определение через род и видовое отличие является наиболее распространенным. Здесь род – множество предметов, из которых выделяются предметы, имеющие определенные признаки – видовые отличия (качества и свойства),

являющиеся доминирующими в знаковой системе [6]. Качественное свойство характеризует структуру объекта, этот признак входит в определение понятия, обозначенного соответствующим термином. С одной стороны, если несколько понятий являются видовыми по отношению к одному и тому же родовому, то они наследуют все свойства родового понятия. Между терминами устанавливается соотношение по объемам в зависимости от их содержания, раскрывающегося в определении. При этом происходит деление родового понятия, которое может происходить по разным основаниям деления в зависимости от цели исследования. С другой стороны, само положение термина в терминологической системе неявно содержит информацию о структурных отличиях вещественного объекта от других, находящихся как на одном уровне абстрагирования, так и на других. Таким образом, множество вещественных объектов и множество родовидовых связей образуют терминологическую систему в виде дерева, корневой вершиной которого является термин *вещественный объект*, обозначающий абстрактный объект, а концевыми вершинами – термины, обозначающие реальные объекты производственной системы (конкретный станок, транспортное средство и прочие, которые являются средствами производства определенного цеха машиностроительного предприятия).

Родовидовые отношения в информационном плане представляют собой опорную структуру, так как при решении задач анализа и синтеза производственной системы происходит движение от абстрактного к конкретному. При этом выстраивается концептуальная схема с использованием терминов в качестве узловых точек. Это означает не только то, что каждый термин в терминологической системе должен занимать определенное место, но и то, что само место определяет его свойства в рамках терминологической системы исследуемой предметной области.

ФОРМАЛИЗАЦИЯ ОБЪКТОВ И ОТНОШЕНИЙ В ТЕРМИНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ

С математической точки зрения наличие свойства есть необходимое условие определяемости множества. Между однородными понятиями устанавливаются отношения по содержанию, а значит, и по объемам. Понятия, объемы которых совпадают, являются синонимичными, что в научной терминологии неприемлемо. Понятия, находящиеся в отношении контрадикторности, не имеют общих элементов и являются видами одного рода. При этом в сумме они составляют объем родового понятия, при делении которого выбирается основание, важное с точки зрения исследователя, используемое при оптимизационных расчетах. Это становится возможным из-за того, что такие объекты находятся на одном уровне абстрагирования, имеют общие свойства (свойства родового понятия) и в то же время отличительные свойства, в соответствии с которыми возможно их сравнение по выбранным критериям. Понятия, получающиеся при делении по разным признакам, являются логически независимыми. Соответственно, они могут участвовать в решении разных производственных задач. Количество и способ деления родового понятия в системе зависят от задач, решаемых обработчиком, которые определяются положением термина в терминологической системе и его системными связями в концептах предметной области.

В разных системах проявляются те или иные свойства объектов, представляемых элементами одного и того же множества. Несмотря на то что математический аппарат обычной теории множеств не предусматривает описания и анализа свойств элементов множества, а в ИПИ-технологиях эта проблема осложняется необходимостью обеспечения целостного представления о моделируемом объекте у различных категорий пользователей на разных этапах жизненного цикла изделия, есть

возможность создания единой системы понятий, охватывающей все предметы и явления предметной области [7]. При этом должны соблюдаться некоторые правила:

для любого множества M существует множество $\{M\}$, состоящее только из элемента y :

$$\square y (y \in \{M\} \Leftrightarrow y = M).$$

для любых двух множеств M_1 и M_2 можно образовать их объединение, пересечение и разность:

$$y \in (M_1 \cup M_2) \Leftrightarrow [(y \in M_1) \vee (y \in M_2)];$$

$$y \in (M_1 \cap M_2) \Leftrightarrow [(y \in M_1) \wedge (y \in M_2)];$$

$$y \in (M_1 \setminus M_2) \Leftrightarrow [(y \in M_1) \vee (y \notin M_2)].$$

Эти правила позволяют ввести в рассмотрение все конечные системы множеств.

Рассмотрим термин *фреза* и его положение в терминологической системе [8]. Соответствующее понятие можно определить как «инструмент – тело вращения, на образующей которого (иногда и на торце) имеются режущие зубья». В терминологической системе *Производственная система*, в которой термины соединены связями *род – вид* и *система – элемент*, термин *фреза* занимает свое место в соответствии со структурой производственной системы в подсистеме *Инструменты* (рис. 1). Здесь обозначают связь *род – вид*. Термин *инструмент фрезерной группы (фреза)* обозначает множество всех фрез производственной системы, которое может быть представлено как объединение подмножеств при делении объема понятия по выбранному основанию (рис. 2).

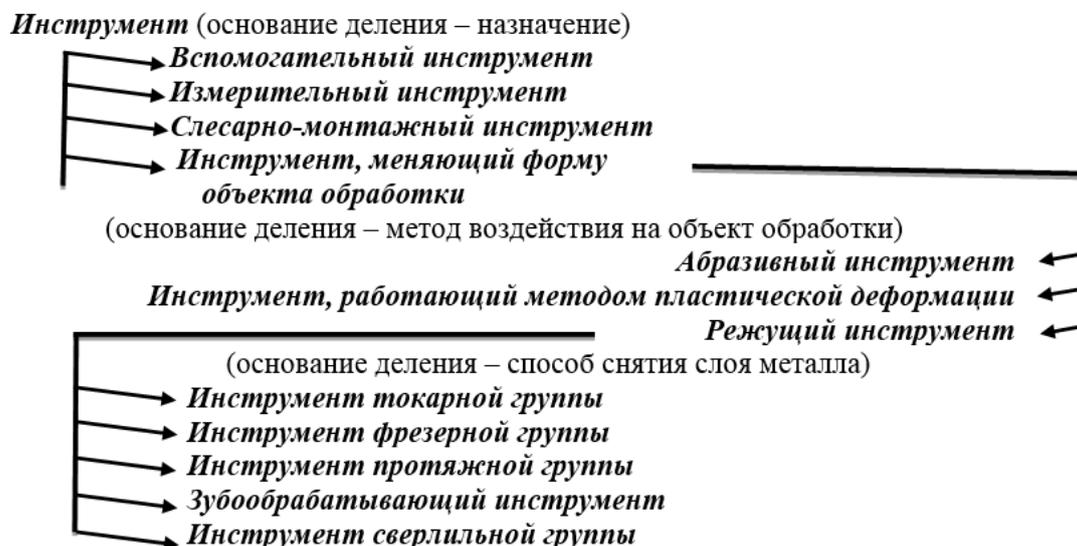


Рис. 1. Место термина *фреза* (инструмент фрезерной группы) в подсистеме *Инструмент* производственной терминологической системы



Рис. 2. Деление объемородового понятия *фреза* (Q) на объемовидовые в зависимости от основания деления

Пусть Q – множество фрез. При его делении по одному основанию получаем подмножества, находящиеся в отношении контрастности:

$$Q = Q_{11} \cup Q_{12} \cup Q_{13} = Q_{21} \cup Q_{22} \cup Q_{23} = \dots = Q_{71} \cup Q_{72} \cup Q_{73} \cup Q_{74} \cup Q_{75} \cup Q_{76} \cup Q_{77} \cup Q_{78} \cup Q_{79}.$$

При этом выполняется правило деления по одному основанию:

$$Q_{i1} \cap Q_{i2} \cap \dots \cap Q_{in} = \emptyset.$$

Такое описание позволяет при использовании теории множеств и булевой логики производить поиск в базе знаний необходимых вещественных объектов, таких как инструмент, детали, заготовки, станочное оборудование и др. Так, поиск всех фрез, присутствующих в системе и обладающих определенными характеристиками, сводится к поиску подмножества множества Q . Основание деления, по которому проводится поиск, определяется концептуальными связями рассматриваемого объекта в предметной области. Для решения задачи выбора фрезы как металлорежущего инструмента необходимо использовать ее положение в системе СПИД (*станок – приспособление – инструмент – деталь*), представляющей собой один из основных

концептов технологии машиностроения. В системе СПИД металлорежущий инструмент связан со станком и деталью. Так, тип станка определяет способ снятия слоя металла и уровень специализации, а форма поверхности детали – назначение и конструкцию фрезы.

Например, поиск в системе множества фрез (Q_k) с характеристиками *фреза универсальная, торцевая, для обработки плоской поверхности* осуществляется по формуле

$$Q_k = Q_{I3} \cap Q_{712}.$$

Тогда на нижнем уровне абстрагирования в терминологической системе:

$$q_k \in Q_k = [(q_k \in Q_{I3}) \wedge (q_k \in Q_{712})],$$

где q_k – термин, обозначающий элемент множества Q_k – *универсальная торцевая фреза для обработки плоской поверхности*, родовыми для которого являются понятия *фреза универсальная* и *торцевая фреза для обработки плоских поверхностей*, и наследующий все свойства как Q_{I3} (фрез универсальных), так и Q_{712} (торцевых фрез для обработки плоских поверхностей).

Аналогично поиск необходимых множеств материальных объектов, находящихся в рассматриваемой системе, связанных родовидовыми отношениями, обработчик может производить на разных уровнях абстрагирования описанной терминологической системы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Терминологическая система составляет основу информационной системы предметной области машиностроения. Каждый термин занимает в ней строго определенное место, которое в большей степени определяет свойства материальных объектов. Отношения *род – вид* и *система – элемент* задают структуру такой системы. При этом родовидовые отношения являются, как правило, определяющими, а системные связи могут изменяться в зависимости от концептов, основанных на теоретических знаниях предметной области.

Использование терминологической системы в системах автоматизированного проектирования технологических процессов позволяет решать сложные задачи поиска приемлемого решения (технологического процесса с выбором) для изготовления конкретной детали на основе формального описания ее параметров, что обеспечивает повышение качества проектирования и при этом не требует высокой квалификации специалиста.

ЛИТЕРАТУРА

1. Полетаева Е.В., Горлов И.В. К проблеме формализации знаний при создании CALS-технологий в области машиностроения // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2023. № 4 (20). С. 69–76.
2. Беседина И.П., Белякова А.П., Жабаева В.А. Анализ и сравнение современных САПР ТП отечественных разработчиков // *Теория и практика современной науки*. 2019. № 6 (48). С. 123–127.
3. Норенков И.П. Интеллектуальные технологии на базе онтологий // *Информационные технологии*. 2010. № 1. С. 17–23.
4. Полетаева Е.В., Горлов И.В. Решение задач синтеза производственных систем на основе онтологии предметной области машиностроения // *Вестник Тверского*

государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2019. № 2 (2). С. 40–50.

5. Семиотика: антология / сост. Ю.С. Степанов. М.: Академический проект; Екатеринбург: Деловая книга. 2001. 702 с.

6. Войшвилло Е.К., Дегтярев М.Г. Логика: учебник. М.: ВЛАДОС-ПРЕСС. 2001. 528 с.

7. Павлов В.В. Полихроматические множества и графы в структурном моделировании свойств технических систем // *Информационные технологии*. 2008. № S2. С. 1–32.

8. Гречишников В.А., Схиртладзе А.Г., Борискин В.П., Пульбере А.И., Чупина Л.А. Формообразующие инструменты машиностроительных производств. Инструменты общего назначения: учебник. Старый Оскол: ТНТ. 2023. 432 с.

Для цитирования: Полетаева Е.В., Горлов И.В. Родовидовые отношения как опорная структура автоматизированной информационной системы машиностроения // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2024. № 4 (24). С. 89–95.

GENERAL RELATIONS AS A SUPPORTING STRUCTURE OF AN AUTOMATED INFORMATION SYSTEM OF MECHANICAL ENGINEERING

E.V. POLETAEVA, Cand. Sc., I.V. GORLOV, Dr. Sc.

Tver State Technical University
22, Af. Nikitin emb., 170026, Tver, e-mail: epolet2010@mail.ru

The article is devoted to the issues related to the development of models of objects and processes, which are part of technological preparation of production, in the field of computer-aided design of technological processes of parts manufacturing. Conceptual objects and structural relations between these objects are considered. Special attention is paid to the terms “material object” and “generic relations”. It is shown what role they play in the knowledge system of the subject area of mechanical engineering. An example of coding of elements of machine-building production system and relations by means of structural modeling is given. The questions related to the creation of algorithms processing the coded information for solving the problems of selecting the elements of the production system at different levels of abstraction are studied. An example of engineering problem solving on the basis of the structure of terminological system of mechanical engineering ontology is given.

Keywords: mechanical engineering, design automation, technological preparation of production, ontology, structural modeling, terminological system, CALS-technologies, knowledge bases.

Поступила в редакцию/received: 19.08.2024; после рецензирования/revised: 16.09.2024;
принята/accepted: 04.10.2024

РЕАЛИЗАЦИЯ МОДУЛЬНОГО ПРИНЦИПА НА БАЗЕ ОНТОЛОГИИ ПРЕДМЕТНОЙ ОБЛАСТИ МАШИНОСТРОЕНИЯ

Е.В. ПОЛЕТАЕВА, канд. техн. наук, И.В. ГОРЛОВ, д-р техн. наук

Тверской государственный технический университет
170026, Тверь, наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: epolet2010@mail.ru

© Полетаева Е.В., Горлов И.В., 2024

В статье отмечено, что внедрение модульного принципа в машиностроении является одним из основных условий автоматизации производственных систем и процессов. Рассмотрено модульное представление объекта обработки на базе структурного построения детали и технологического процесса. В рамках онтологии предметной области машиностроения модули детали представлены как концептуальные объекты терминологической системы. Исследованы основные структурные элементы детали и связи между ними, составляющие модель объекта обработки. Приведен пример реализации модульного принципа при построении детали типа тела вращения.

Ключевые слова: машиностроение, автоматизация проектирования, технологическая подготовка производства, онтология, структурное моделирование, модульный принцип, базы знаний.

DOI: 10.46573/2658-5030-2024-4-96-103

ВВЕДЕНИЕ

В условиях многономенклатурного производства для минимизации издержек и сокращения сроков изготовления изделий машиностроения применяют современные средства типизации и унификации объектов производства, технологических процессов, станочного оборудования и оснастки. Одним из таких средств является модульная технология, позволяющая свести к минимуму разнообразие технологических процессов и его элементов, внедрить поточную организацию изготовления деталей в условиях мелкосерийного и даже единичного производства на основе типизации и группового подхода. Модульный принцип построения технологической системы способствует созданию автоматизированной системы, содержащей формализованное представление элементов и структурных связей, обеспечивающих автоматизацию конструкторских и технологических расчетов. Метод модульной технологии основан на представлении процесса изготовления деталей в виде совокупности унифицированных технологических решений (технологических модулей), каждое из которых обеспечивает получение определенного конструктивного элемента детали (конструктивного модуля с установленными параметрами) [1, 2]. Это современный тип технологии, базирующийся на представлении детали совокупностью модулей поверхностей (МП) и построении технологического процесса деталей из модулей технологического процесса (МТИ), являющихся законченными частями процесса по изготовлению МП. Несмотря на то что модульный принцип построения объекта обработки хорошо известен, его применение не получило широкого распространения в конструкторско-технологической подготовке производства из-за сложности стыковки конструкторской и технологической моделей деталей. Модульное проектирование в

рамках онтологии автоматизированной системы проектирования технологических процессов (далее – онтологии) устраняет эту проблему.

ПОСТРОЕНИЕ СТРУКТУРНОЙ МОДЕЛИ ДЕТАЛИ

В основу модульной технологии в машиностроении положено модульное представление объекта обработки – детали. Структурная модель детали является системой модулей – поверхностей, обрабатываемых за один установ и обладающих определенными параметрами. Все модули разделяются в зависимости от служебного назначения (рабочие, базировочные и связующие). Каждый модуль при этом представляет собой систему поверхностей, имеющих конструктивно-геометрическое оформление (рис. 1).

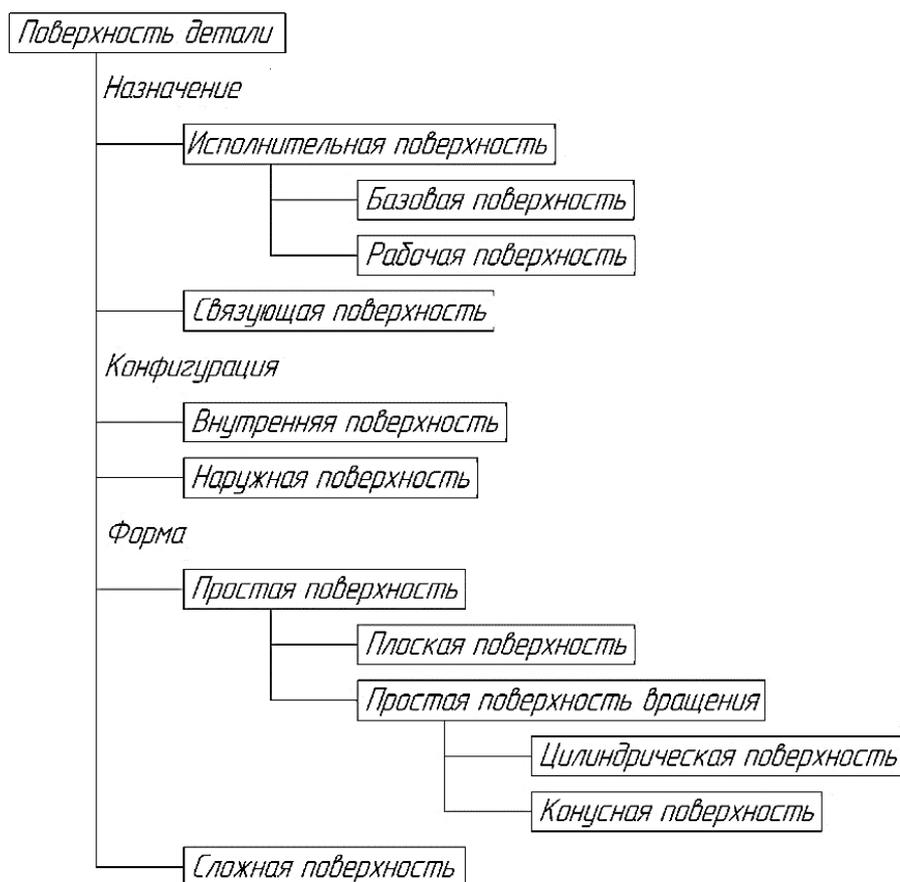


Рис. 1. Фрагмент информационной системы, содержащий связи модуль – поверхность детали

Основой онтологии является терминологическая система, представляющая собой графовую структуру с вершинами, обозначающими вещественные объекты, процессы, свойства, и связи между ними [3, 4]. Формализуется она в виде системы отношений реляционной базы данных [5]. В онтологии деталь может быть отражена как система модулей, а каждый модуль – как система поверхностей. Вся номенклатура деталей представляется в виде графа, а деталь – в виде подграфа этого графа. Здесь модули выступают как концепты [6].

Для примера рассмотрим деталь типа *стакан* (рис. 2). Назовем ее *Стакан01*. Пронумеруем поверхности детали и, согласно классификации поверхностей, терминологически обозначим их (рис. 3).

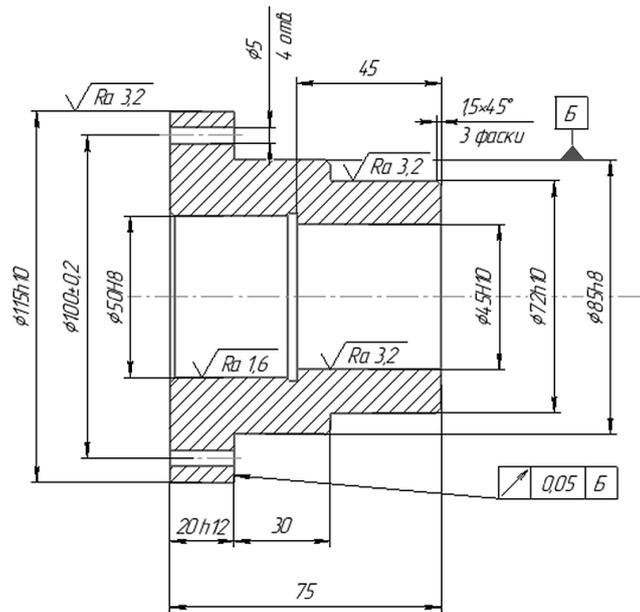


Рис. 2. Эскиз детали *Стакан01*

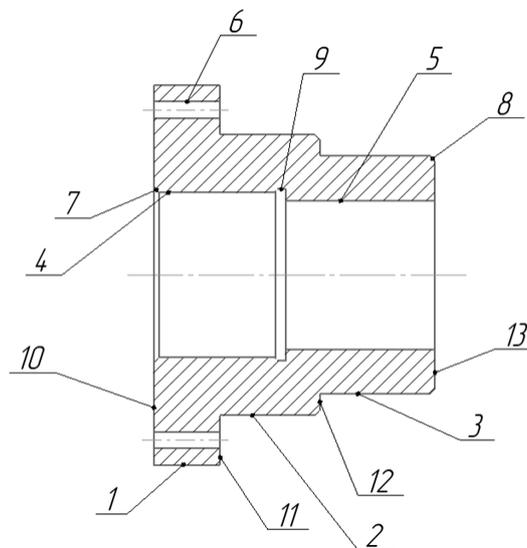


Рис. 3. Нумерация поверхностей детали *Стакан01*:

- 1 – цилиндрическая связующая наружная поверхность;
- 2 – цилиндрическая базирующая наружная поверхность;
- 3 – цилиндрическая связующая наружная поверхность;
- 4 – цилиндрическая рабочая внутренняя поверхность;
- 5 – цилиндрическая связующая внутренняя поверхность;
- 6 – цилиндрическая рабочая внутренняя поверхность;
- 7 – цилиндрическая связующая внутренняя поверхность;
- 8 – цилиндрическая связующая наружная поверхность;
- 9 – сложная связующая внутренняя поверхность;
- 10 – плоская связующая наружная поверхность;
- 11 – плоская базирующая наружная поверхность;
- 12 – плоская связующая наружная поверхность;
- 13 – плоская связующая наружная поверхность

Для каждой обрабатываемой поверхности имеется типовой маршрут обработки (таблица).

Маршрут обработки
некоторых поверхностей детали *Стакан01*

Номер поверхности	Размер	Квалитет (IT)	Шероховатость (Ra), мкм	Маршрут обработки
2 (баз.)	$\varnothing 85h8$	8	1,6	1. Черновое точение 2. Получистовое точение 3. Чистовое точение 4. Предварительное шлифование
6 (раб.)	$\varnothing 5H14$	14	10	Сверление
11 (баз.)	$20h12$	12	3,2	1. Черновое точение 2. Получистовое точение

СОЗДАНИЕ СТРУКТУРНОЙ МОДЕЛИ ДЕТАЛИ

Структурная модель детали реализуется в открытой среде разработки программного обеспечения, предоставляющей возможность кроссплатформенной разработки приложений в Delphi-подобном окружении (рис. 4). Интерфейс системы содержит несколько вкладок, позволяющих осуществлять ввод, вывод, модификацию, удаление терминов и связей между ними, основными из которых являются *род – вид*, *система – элемент*.

В информационной системе работа по созданию структурной модели детали состоит из нескольких шагов:

1. Добавления нового термина *Стакан01* в подсистему вещественных объектов.
2. Добавления терминов, обозначающих модули (рис. 5а).
3. Добавления терминов, означающих поверхности стакана, и модулей (рис. 5б).
4. Распределения поверхностей по модулям (МБ – модуль базирования, РМ – рабочий модуль, СМ – связующий модуль).

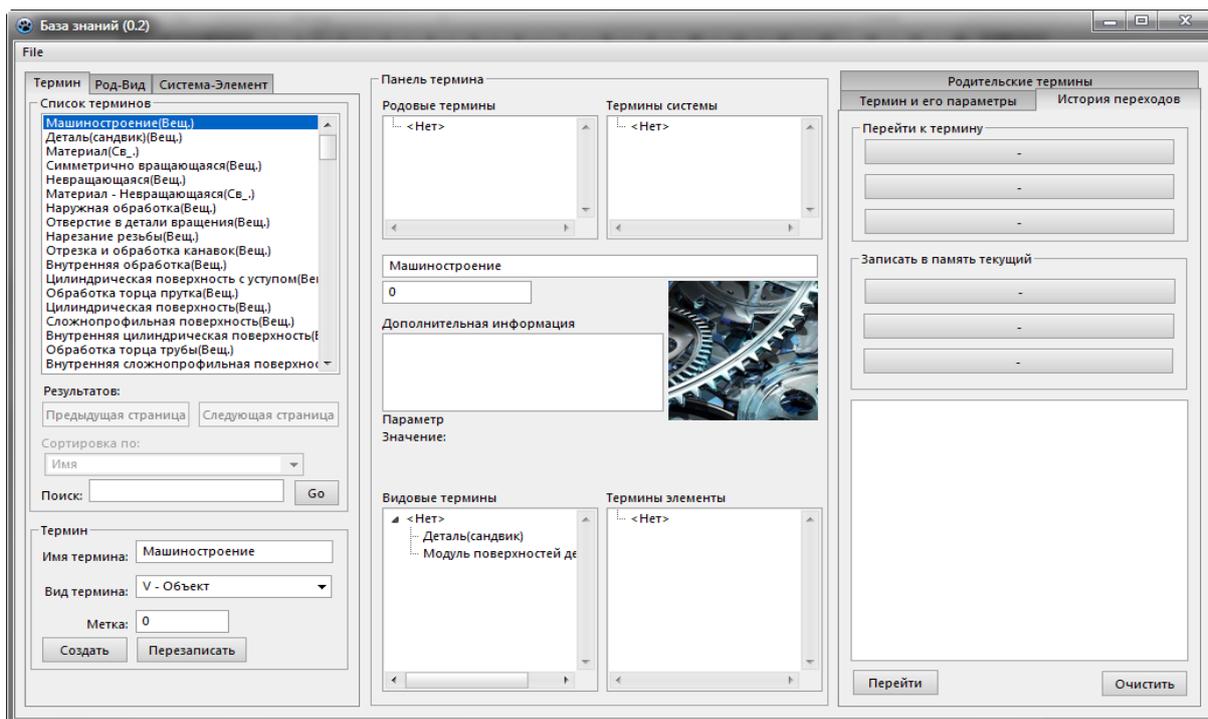


Рис. 4. Интерфейс информационной системы

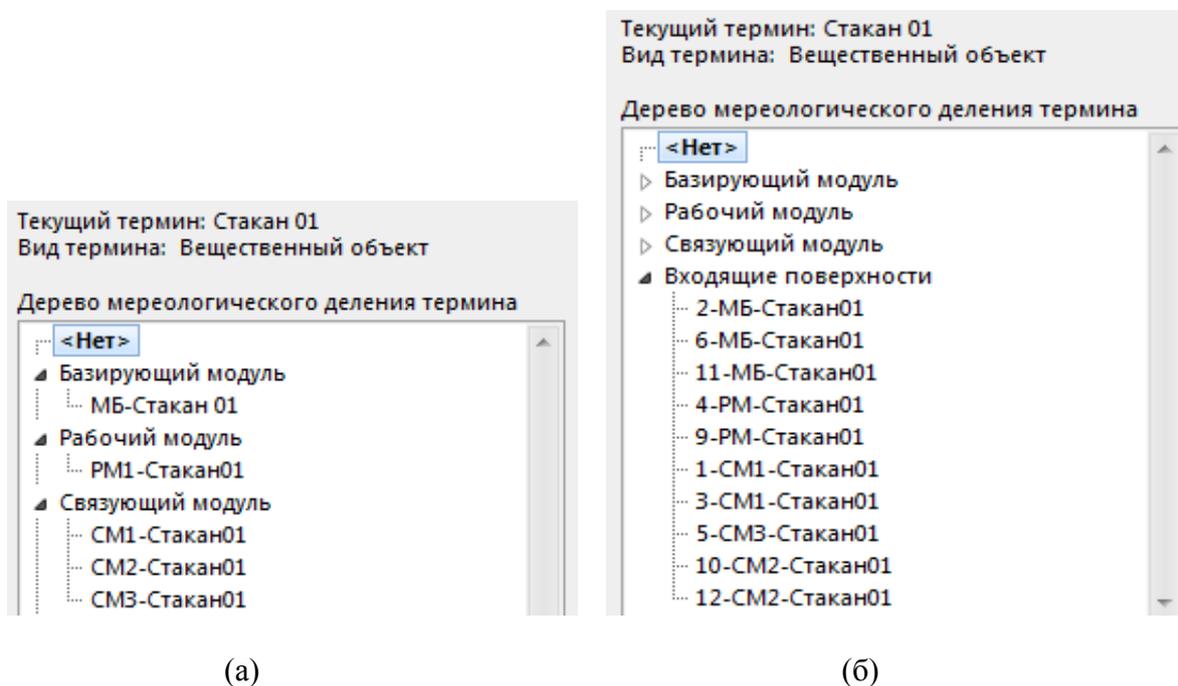


Рис. 5. Окна ввода дерева терминов (а); поверхностей и модулей (б)

В результате модуль детали связан как с деталью, так и с деревом модулей. Рассмотрим поверхность 2 (см. рис. 3) и ее связи на рис. 6.

Поверхность 2-МБ входит в состав базирующего модуля детали *Стакан01* и сама является частью детали, в то время как термин *Базирующий модуль МБ-Стакан01* является видовым термином для термина *Две плоскости и наружная цилиндрическая поверхность* и элементом детали *Стакан01*, термины поверхностей *2-МБ-Стакан01*, *6-МБ-Стакан01*, *11-МБ-Стакан01* являются элементами термина *МБ-Стакан01* (рис. 7).

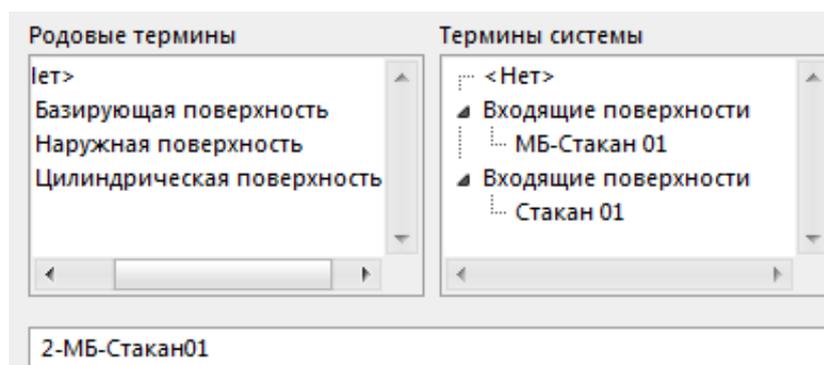


Рис. 6. Связи термина поверхности 2 (см. рис. 3)

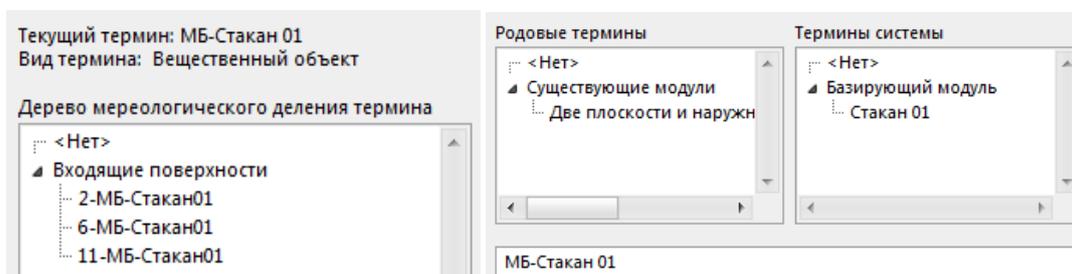


Рис. 7. Связи термина *МБ-Стакан01*

Подготовка к автоматизированному проектированию технологии изготовления детали заключается в том, что после создания полной семантической сети детали (структурной модели детали), классифицировав каждую поверхность, необходимо заполнить базу терминами-свойствами, которые будут содержать определенную технологию (маршрут обработки – технологический модуль) в соответствии с классификацией поверхности.

Для примера создадим технологию для обработки базирующей наружной цилиндрической поверхности. С этой целью введем термин-свойство *БНЦ-т*. Аббревиатура, содержащаяся в названии, обозначает принадлежность термина. После ввода записи перейдем к термину поверхности *2-МБ-Стакан01* и на вкладке *Термин и его параметры* нажмем кнопку *Импорт свойств (параметров) по связям* (рис. 8). В результате в окне *Дополнительная информация* получим маршрут обработки данной поверхности. Аналогично можно получить маршруты обработки на другие модули с такими же параметрами.

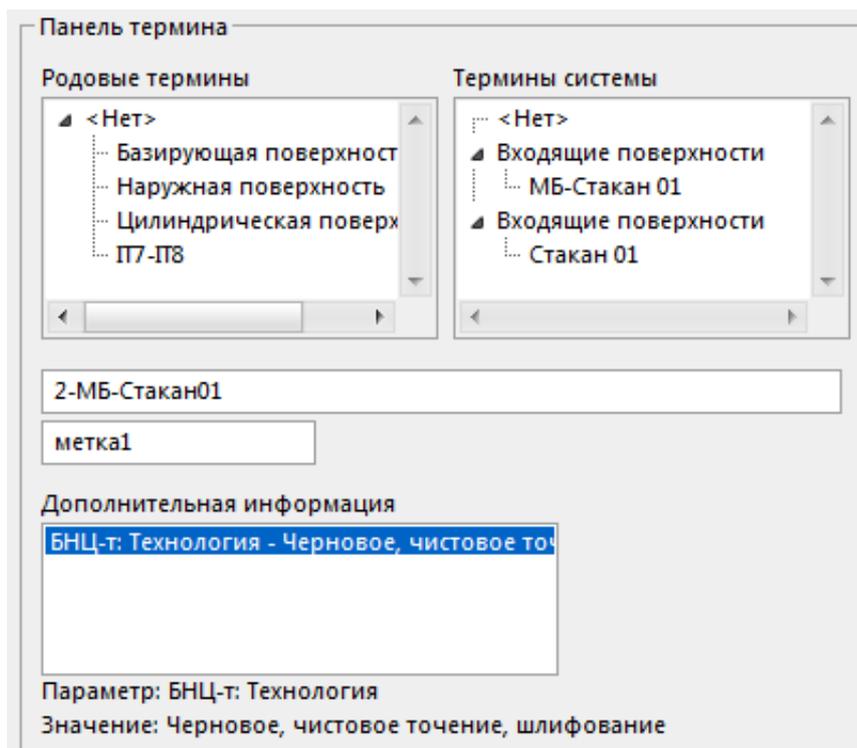


Рис. 8. Результат создания базы знаний

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Модульная технология, основанная на технологической и конструкторской унификации, способствует типизации как объектов обработки, так и технологических процессов и технологического оснащения. Встроенная в онтологию предметной области машиностроения, она объединяет в себе преимущества единичного, типового и группового технологических процессов, что позволяет сокращать трудоемкость технологической подготовки производства за счет построения технологического процесса, учитывающего специфику детали, дает возможность группировать детали в партии по общности содержащихся в них модулей. Реализация концепции модульности в построении элементов производственной системы сокращает сроки подготовки производства (конструкторской и технологической) новых изделий, повышает мобильность и адаптивность технологии в условиях многономенклатурного производства.

ЛИТЕРАТУРА

1. Базров Б.М. Модульная технология в машиностроении. М.: Машиностроение. 2001. 368 с.
2. Мартыненко О.В. Применение модульного принципа в конструкторско-технологической подготовке производства // *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. 2016. № 12-4. С. 605–608.
3. Полетаева Е.В. Построение информационной системы машиностроительного производства на базе предметной онтологии: монография. Тверь: ТвГТУ. 2015. 196 с.
4. Норенков И.П. Интеллектуальные технологии на базе онтологий // *Информационные технологии*. 2010. № 1. С. 17–23.

5. Полетаева Е.В., Горлов И.В. Реализация обработчика онтологии предметной области машиностроения // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2023. № 4 (20). С. 76–83.

6. Полетаева Е.В., Галанцев А.О. Использование модульного принципа в технологическом проектировании в условиях многономенклатурного производства // *Вестник Тверского государственного технического университета*. 2018. № 1 (33). С. 57–60.

Для цитирования: Полетаева Е.В., Горлов И.В. Реализация модульного принципа на базе онтологии предметной области машиностроения // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2024. № 4 (24). С. 96–103.

IMPLEMENTATION OF MODULAR PRINCIPLE BASED ON ONTOLOGY OF SUBJECT AREA OF MECHANICAL ENGINEERING

E.V. POLETAEVA, Cand. Sc., I.V. GORLOV, Dr. Sc.

Tver State Technical University
22, Af. Nikitin emb., 170026, Tver, e-mail: epolet2010@mail.ru

The article notes that the introduction of the modular principle in mechanical engineering is one of the main conditions for the automation of production systems and processes. The modular representation of the processing object on the basis of the structural design of the part and technological process is considered. Within the framework of the ontology of the subject area of mechanical engineering the modules of the part are presented as conceptual objects of the terminological system. The main structural elements of the part and the relations between them, which constitute the model of the machining object, are investigated. An example of realization of the modular principle in the construction of the part of the body of rotation type is given.

Keywords: mechanical engineering, design automation, technological preparation of production, ontology, structural modeling, modular principle, knowledge bases.

Поступила в редакцию/received: 19.08.2024; после рецензирования/revised: 17.09.2024;
принята/accepted: 04.10.2024

**ВЕСТНИК
ТВЕРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА**

Серия «Технические науки»

**Научный рецензируемый журнал
№ 4 (24), 2024**

**Print ISSN 2658-5030
Online ISSN 2687-0029**

Редактор С.В. Борисов
Корректор Ю.Ф. Воробьева

Подписано в печать 22.11.2024

Дата выхода в свет 09.12.2024

Формат 60 x 84/8

Физ. печ. л. 13

Тираж 500 экз.

Цена свободная

Усл. печ. л. 12,09

Заказ № 274

Бумага писчая

Уч.-изд. л. 11,31

С – 104

Редакционно-издательский центр
Тверского государственного технического университета
170026, Тверь, наб. Афанасия Никитина, 22
Отпечатано в ООО «Издательство «Триада»
170034, Тверь, пр. Чайковского, д. 9, офис 514