

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

**ВЕСТНИК
ТВЕРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА**

Серия «Технические науки»

**Научный журнал
№ 1 (1)**

Тверь 2019

Редакционная коллегия

Главный редактор А.Н. Болотов, д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой ТвГТУ

Члены редакционной коллегии:

В.В. Измайлов, д-р техн. наук, профессор ТвГТУ, зам. главного редактора по направлению «Машиностроение и машиноведение»

А.Л. Яблонев, д-р техн. наук, доцент, зав. кафедрой ТвГТУ, зам. главного редактора по направлению «Транспортное, горное и строительное машиностроение»

Г.Б. Бурдо, д-р техн. наук, доцент, зав. кафедрой ТвГТУ, зам. главного редактора по направлению «Информатика, вычислительная техника и управление»

Л.Е. Афанасьева, канд. физ.-мат. наук, доцент ТвГТУ, ответственный секретарь

Н.И. Березовский, д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой БНТУ, Республика Беларусь

П.Н. Богданович, д-р техн. наук, профессор БелГУТ, Республика Беларусь

И.С. Гершман, д-р техн. наук, профессор, ведущий специалист ВНИИЖТ

В.В. Голенков, д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой БГУИР, Республика Беларусь

К.А. Головин, д-р техн. наук, доцент, зав. кафедрой ТулГУ

И.В. Горлов, д-р техн. наук, профессор ТвГТУ

В.И. Гультияев, д-р техн. наук, доцент, зав. кафедрой ТвГТУ

Б.Ф. Зюзин, д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой ТвГТУ

Л.И. Кантович, д-р техн. наук, профессор, профессор НИТУ «МИСиС»

А.М. Керопян, д-р техн. наук, профессор НИТУ «МИСиС»

Л.В. Козырева, д-р техн. наук, доцент ТвГТУ

А.В. Кондратьев, д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой ТвГТУ

Б.И. Марголис, д-р техн. наук, доцент, зав. кафедрой ТвГТУ

В.В. Мешков, д-р техн. наук, профессор, декан ТвГТУ

А.В. Михайлов, д-р техн. наук, профессор СПГУ

М.В. Новоселова, канд. техн. наук, доцент ТвГТУ

Б.В. Палюх, д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой ТвГТУ

Н.А. Семенов, д-р техн. наук, профессор ТвГТУ

И.А. Солдатенков, д-р физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник ИПМех РАН

П.В. Цибуленко, канд. техн. наук, доцент, декан БНТУ, Республика Беларусь

В.С. Шоркин, д-р физ.-мат. наук, профессор ОГУ имени И.С. Тургенева

Л.Ш. Шустер, д-р техн. наук, профессор УГАТУ

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

E-mail: vestnik_tstu_tekh@mail.ru

Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки» публикует научные статьи и краткие обзоры по направлениям: 05.02.00 Машиностроение и машиноведение, 05.05.00 Транспортное, горное и строительное машиностроение, 05.13.00 Информатика, вычислительная техника и управление. Журнал издается с января 2019 года, выходит 4 раза в год.

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

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

СОДЕРЖАНИЕ

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

<i>Болотов А.Н., Бурдо Г.Б., Новикова О.О., Новиков В.В.</i> Механические свойства поверхности, смазанной магнитным маслом.....	6
<i>Горлов И.В., Полетаева Е.В.</i> Синтез технологического процесса на основе анализа структурной модели детали.....	12
<i>Архаров А.П., Зыков Д.Ю.</i> Способ измерения паза и ступицы корпусной детали.....	21
<i>Афанасьева Л.Е., Новоселова М.В., Иванова А.И., Гречишкин Р.М.</i> Абразивная износостойкость сплава Ti6Al4V, полученного по технологии селективного электронно-лучевого плавления.....	26

ТРАНСПОРТНОЕ, ГОРНОЕ И СТРОИТЕЛЬНОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

<i>Яблонев А.Л., Гусева А.М.</i> Определение энергоемкости процесса формования кускового торфа.....	36
<i>Михеев И.И., Горячев В.И., Щербакова Д.М.</i> Ленточный фильтр-пресс непрерывного действия с равномерной подачей отжимаемого материала в прессовое пространство.....	46
<i>Морозихина И.К., Харламов В.Е., Крылов К.С.</i> Влияние торфяной среды на усталостное повреждение рабочих поверхностей деталей.....	52

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

<i>Еремеев А.П.</i> Методы и программные средства интеллектуальной поддержки принятия решений для мониторинга и управления сложными техническими устройствами.....	63
<i>Иванов В.К.</i> Особенности организации хранилища данных на основе интеллектуализации поискового агента и эволюционной модели отбора целевой информации.....	75
<i>Илясов Л.В.</i> Исследование возможности использования эффекта изменения электропроводности порошка активированного угля в аналитической технике.....	85

ХРОНИКА

<i>Зюзин Б.Ф., Копенкина Л.В.</i> Амарян Л.С. – основатель Тверской научной школы механики торфа и торфяной залежи (к 90-летию со дня рождения).....	93
--	----

CONTENTS

MECHANICAL ENGINEERING AND MACHINE SCIENCE

<i>Bolotov A.N., Burdo G.B., Novikova O.O., Novikov V.V.</i> Mechanical properties of surface of lubricated magnetic oil	6
<i>Gorlov I.V., Poletaeva E.V.</i> Synthesis based on analysis of a structural detail model for the technological process	12
<i>Arkharov A.P., Zykov D.Yu.</i> Method of measurement of groove and body part hub	21
<i>Afanasieva L.E., Novoselova M.V., Ivanova A.I., Grechishkin R.M.</i> Abrasive wear resistance of Ti6Al4V alloy prepared by selective electron beam melting	26

TRANSPORT, MINING AND CONSTRUCTION MACHINERY

<i>Yablonev A.L., Guseva A.M.</i> Determination of power consumption of process of formation of lumpy peat	36
<i>Mikheyev I.I., Goryachev V.I., Scherbakova D.M.</i> Tape filter press of continuous action with uniform supply of wrung-out material in press space	46
<i>Morozikhina I.K., Harlamov V.E., Krylov K.S.</i> Influence of peat environment on fatigue damage of working surfaces of details.....	52

INFORMATICS, COMPUTER FACILITIES AND MANAGEMENT

<i>Eremeev A.P.</i> Methods and program tools of intelligent decision support for monitoring and managing complex technical devices	63
<i>Ivanov V.K.</i> Peculiarities of organization of data storage based on intelligent search agent and evolutionary model selection the target information	75
<i>Iliasov L.V.</i> Investigation of activated carbon electrical conductivity change application in analytical technic.....	85

NEWS, EVENTS, MEMORIS

<i>Zyuzin B.F., Kopenkina L.V.</i> Amaryan L.S. – founder of Tver scientific school peat and peat mechanics (on the 90th anniversary of birth).....	93
---	----



*Главный редактор журнала,
д-р техн. наук, профессор
А.Н. Болотов*

УВАЖАЕМЫЕ ЧИТАТЕЛИ, КОЛЛЕГИ!



*Ответственный секретарь,
канд. физ.-мат. наук, доцент
Л.Е. Афанасьева*

Предлагаем вашему вниманию первый номер нового рецензируемого научного журнала «Вестник Тверского государственного технического университета. Серия “Технические науки”».

Представленный журнал призван расширить горизонты технических наук, открыть работы ученых и специалистов для широкого обсуждения и использования результатов на практике. Будет освещать результаты фундаментальных и прикладных междисциплинарных исследований – тематика его материалов охватит различные сферы исследований, включая машиностроение и машиноведение, транспортное, горное и строительное машиностроение, информатику и вычислительную технику.

Зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций, регистрационный номер: серия ПИ № ФС77-74321 от 19 ноября 2018 г.

Все присылаемые материалы будут рецензироваться, а опубликованные статьи – учитываться в Российском индексе научного цитирования.

Планируется вывести журнал в международные базы цитирования и в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, формируемый Высшей аттестационной комиссией (ВАК), в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней кандидата и доктора наук.

Периодичность выпусков – 4 номера в год; доступ ко всем номерам журнала постоянный, свободный и бесплатный.

В редакционный и экспертный советы нового издания вошли отечественные и зарубежные ученые, сотрудничающие с Тверским государственным техническим университетом по различным научным направлениям.

Благодарим за интерес к нашему изданию и приглашаем к сотрудничеству ученых, аспирантов, докторантов, инженеров и других заинтересованных специалистов. Выражаем уверенность в том, что новый журнал станет современной площадкой для интересных дискуссий и взаимно обогащающего обмена мнениями.

Ждем ваших работ с вниманием и благожелательностью, готовы их рассмотреть и опубликовать.

Редакционная коллегия с благодарностью примет любые конструктивные предложения по совершенствованию журнала и повышению его научного уровня.

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

УДК 621.891

МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОВЕРХНОСТИ, СМАЗАННОЙ МАГНИТНЫМ МАСЛОМ

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

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

Приведены результаты экспериментального исследования особенностей проявления адсорбционного пластифицирования стали под действием магнитных смазочных сред в присутствии неоднородного магнитного поля с градиентом, направленным к поверхности трения. Оценивалось пластифицирующее действие магнитной смазочной среды, содержащей нанодисперсный магнетит, и модельной среды, имеющей аналогичную основу, без магнитных дисперсных частиц. Установлено, что пластифицирующее действие существенно снижает микротвердость поверхности по глубине и его значение стремится к насыщению через несколько часов. Показано, что магнитное масло, даже в отсутствие магнитного поля, сильнее пластифицирует поверхность, чем модельное масло. Наложение неоднородного магнитного поля с градиентом, направленным к поверхности стали, приводит к усилению пластифицирующего действия магнитного масла. Дана оценка влияния пластифицирования поверхностей, смазанных магнитным маслом, на их фрикционное взаимодействие, которое заключается в повышении смазочных свойств магнитного масла ММ-ПЭС, содержащего нанодисперсный магнетит, по сравнению с модельным маслом на основе ПЭС-5. Результаты исследования позволят в дальнейшем направленно влиять на триботехнические характеристики узлов трения с магнитными смазочными средами.

Ключевые слова: магнитные смазочные материалы, поверхностные эффекты, управление трением, трение, износ.

ВВЕДЕНИЕ

Узлы трения, имеющие в качестве смазочного материала магнитные среды, получают все большее применение в конструкциях ответственного наукоемкого оборудования [1–3]. Стабильные фрикционные характеристики, существенно больший ресурс работы и возможность более длительной работы узла без дозаправки смазочным материалом по сравнению с традиционными дают магнитным трибоузлам несомненное преимущество [4, 5]. При целенаправленном повышении эксплуатационных параметров трибосопряжений с магнитными маслами, а также создании новых композиций магнитных смазочных материалов необходимо учитывать особенности протекания физических процессов в зоне фрикционного контакта в присутствии магнитных нанодисперсных материалов, растворенных в сложных активных дисперсионных средах.

При контакте твердых тел с адсорбционно-активными жидкими средами проявляется обнаруженный Ребиндером эффект понижения сопротивления дефор-

мации их поверхностного слоя. Этот эффект, называемый адсорбционным пластифицированием поверхности, проявляется в снижении предела текучести и коэффициента упрочнения поверхности. Пластифицирование наступает в результате того, что адсорбированные молекулы снижают поверхностный энергетический барьер, препятствующий выходу дислокаций на поверхность. Наряду с пластифицированием поверхности происходит понижение прочности тела, однако прочность существенно уменьшается, лишь когда свободная энергия поверхностного взаимодействия соизмерима с поверхностной энергией твердого тела [6–8].

Пластифицирование поверхности влияет на фрикционное взаимодействие следующим образом. Во-первых, снижается сопротивление тангенциальному сдвигу, т.е. уменьшается деформационная составляющая силы трения. Во-вторых, происходит выглаживание поверхности и снижение контактных напряжений и хрупкости, что в совокупности способствует уменьшению износа. Величина адсорбционного пластифицирования зависит от большого количества факторов и пока плохо предсказуема.

Цель исследования – изучение особенностей проявления адсорбционного пластифицирования стали под действием магнитной жидкости (масла) и при наложении неоднородного магнитного поля.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Экспериментально изучалось проявление эффекта адсорбционного пластифицирования при нанесении на поверхность стали магнитного смазочного масла с одновременным воздействием неоднородного магнитного поля с градиентом, направленным к поверхности. Для сравнения оценивалось пластифицирующее действие модельных сред, содержащих те же компоненты, что и у магнитной смазочной среды, но без нанодисперсного магнетита.

Деформационные свойства тонких поверхностных слоев оценивали по их микротвердости на приборе ПМТ-3 методом индентирования алмазной пирамидой Кнуппа. Особенность индентора Кнуппа состоит в том, что при сравнительно большой длине одной из диагоналей отпечатка, размеры которой можно измерить достаточно точно, глубина вдавливания мала (составляет приблизительно 1/30 длины указанной диагонали отпечатка). Это позволило исследовать тонкие поверхностные слои металла глубиной менее 2 мкм. Действие адсорбционной активной среды на поверхность определялось величиной изменения микротвердости поверхности $\Delta H = H_s - H_f$, где H_s – микротвердость поверхности, измеренная сразу после нанесения исследуемой жидкости; H_f – микротвердость поверхности, измеренная при той же нагрузке на индентор, но после фиксированного времени выдержки с нанесенной на поверхность жидкостью.

Изменение микротвердости поверхности оценивали по среднему значению из десяти измерений. Время выдержки под нагрузкой для одного измерения составляло 15 с. Диапазон нагрузок изменялся от 0,5 до 2,0 Н. Объектом исследований были пластинки из стали марки У10А с микротвердостью $H_f = 9,5$ ГПа, поверхность которых полировали до $R_a = 0,12$ мкм и после обработки тщательно промывали.

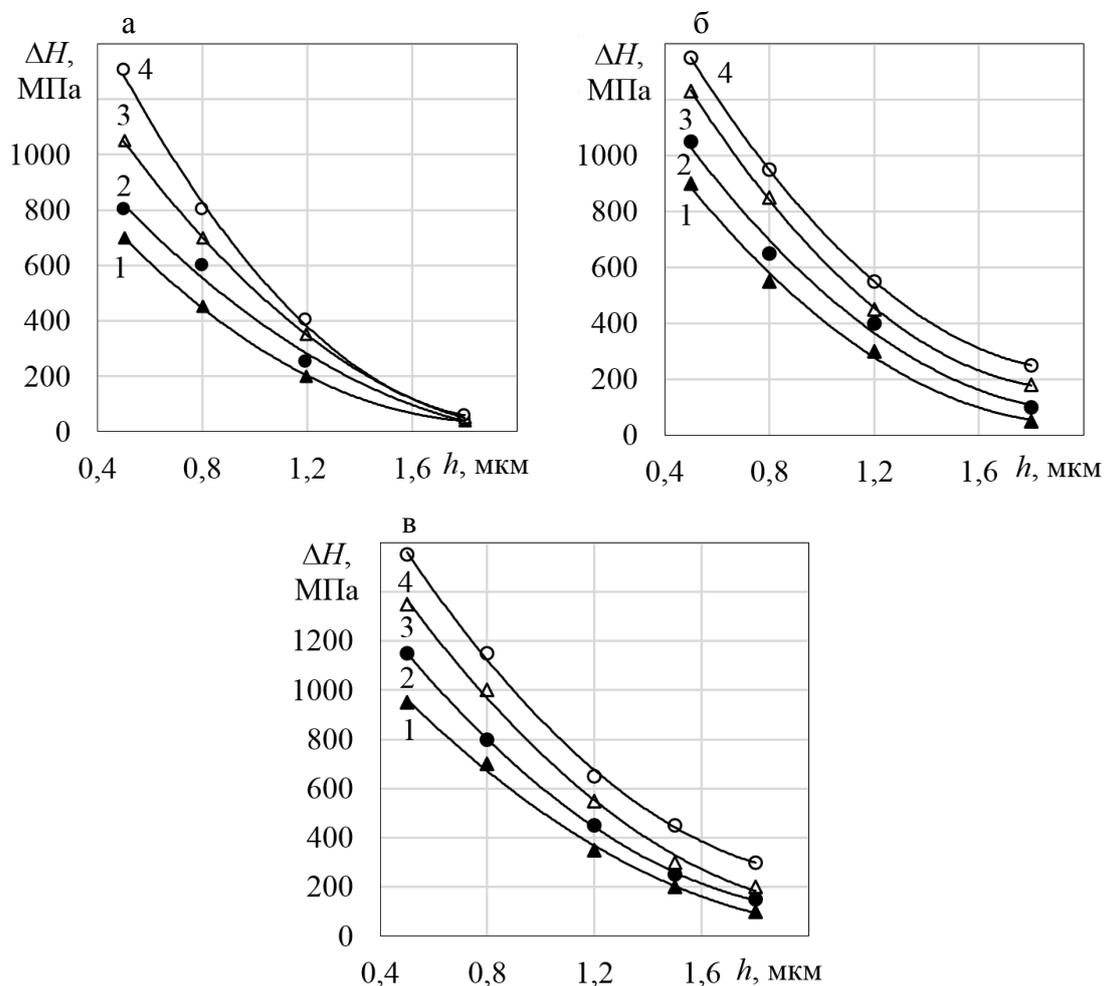
Для оценки скорости формирования граничного смазочного слоя изучалось взаимодействие с поверхностью трех различных по составу магнитных масел (ММ-ТЭА, ММ-ПЭС, ММ-И) с поверхностью стали 20 и бронзы ОСЦ 4-4-2,5. ММ-ТЭА состоит только из триэтанолamina (ТЭА) и наночастиц железа (5 % об.), ММ-ПЭС содержит кремнийорганическую жидкость ПЭС-5 и магнетит (5 % об.), стабилизированный олеиновой кислотой. В состав масла ММ-И входят индустриальное масло без присадок марки И-Г-А-32 (И-20А) и магнетит (8 % об.), стабилизированный

олеиновой кислотой. Для сравнения анализировалось взаимодействие с поверхностью жидкостей, являющихся дисперсионной средой масел.

Испытания проводились на трехпальчиковой машине трения МТП [9, 10] при скорости скольжения 0,24 м/с и давлении 6,5 МПа.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Как видно из рисунка, на котором представлены результаты опытов, пластифицирующее действие хорошо выражено как по глубине, так и во времени. Наиболее сильно оно распространяется на глубину до 1...1,5 мкм, а его значение стремится к насыщению через несколько часов. Постепенно эффект адсорбционного пластифицирования распространяется на глубину более 1,5 мкм. Магнитное масло ММ-ПЭС непосредственно после нанесения (без магнитного поля) сильнее пластифицирует поверхность, чем модельное масло. С течением времени эффект пластифицирования усиливается и качественное различие между действием магнитного и немагнитного масла остается прежним.



Изменение микротвердости стали У10А
под действием различных сред, после нанесения на поверхность:
а – через 0,5 часа; б – через 1 час; в – через 4 часа;
1 – ПЭС – 5 + 5 % олеиновой кислоты; 2 – ММ-ПЭС без поля;
3 – ММ-ПЭС в магнитном поле (24 кА/м);
4 – ММ-ПЭС в магнитном поле (80 кА/м)

В магнитном масле по сравнению с немагнитным поверхностная энергия твердого тела снижается за счет насыщения свободных энергетических связей не только адсорбированными молекулами олеиновой кислоты, но и дополнительно магнитными дисперсными частицами.

В немагнитном масле адсорбционный слой формируется из молекул ПАВ, которые диффундируют к ним из объема. Этот процесс в жидкостях, особенно в таких сравнительно вязких, как ПЭС-5, значительно растянут во времени.

В магнитном масле наряду с молекулами ПАВ происходит движение однодоменных дисперсных частиц к поверхности за счет магнитного притяжения. На своей поверхности они также несут молекулы ПАВ, которые могут десорбироваться с нее и увеличивать вблизи поверхности твердого тела концентрацию молекул, потенциально способных на ней адсорбироваться. Приведенные различия в структуре адсорбционных слоев и механизме их формирования на межфазной поверхности магнитного или немагнитного масла и твердой поверхностью являются причиной различий в скорости и величине снижения микротвердости поверхности трения этими маслами.

Наложение неоднородного магнитного поля с градиентом, направленным к поверхности стали, приводит к тому, что по мере его увеличения пластифицирующее действие магнитного масла еще более усиливается и величина эффекта становится больше (см. рисунок). Внешнее магнитное поле способствует быстрому преодолению частицами хаотического теплового движения и упорядоченной концентрации их около твердой поверхности. Сильнее пластифицируют поверхность вещества, имеющие химическое сродство с материалом поверхности [7]. Дисперсные частицы магнетита имеют сродство с окисными пленками на стали, и это наряду с повышенной их концентрацией около поверхности способствует усилению пластифицирующего эффекта в магнитном поле.

По скорости изменения микротвердости поверхности после нанесения слоя масла можно косвенно судить о скорости формирования граничного смазочного слоя в условиях трения. Особенностью магнитных масел является то, что при воздействии на смазанный ими фрикционный контакт магнитным полем этот процесс можно значительно ускорить. Это и является одной из причин лучших смазочных свойств у магнитного масла ММ-ПЭС, чем у модельного на основе ПЭС-5. Интенсивность линейного изнашивания I_h и коэффициент трения f всех используемых для опытов веществ приведены в таблице [5].

Смазочные свойства магнитных масел и их дисперсионных сред

Смазочный материал	$I_h \cdot 10^{-9}$	f
Масло И-20А	4,0	0,14
Жидкость ПЭС-5	16,0	0,15
Жидкость ПЭС-5 + 1 % олеиновой кислоты	20,0	0,13
Жидкость ПЭС-5 + 5 % олеиновой кислоты	25,0	0,13
Жидкость ТЭА	13,2	0,13
ММ-ТЭА	8,2	0,13
ММ-ПЭС	6,2	0,10
ММ-И	6,8	0,10

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенная оценка влияния пластифицирования поверхностей, смазанных магнитным маслом, на их фрикционное взаимодействие, позволит направленно влиять на триботехнические характеристики трибоузлов. Необходимо более детальное изучение влияния магнитного поля на изменение механических свойств магнито-жидкостных пар трения, особенно с учетом другого проявления эффекта Ребиндера –

адсорбционного понижения прочности, что даст возможность найти новые способы повысить износостойкость и энергоэффективность.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 18-48-690001).

ЛИТЕРАТУРА

1. Болотов А.Н., Новиков В.В., Новикова О.О. Расчет и оптимизация постоянных магнитов для специальных подшипниковых опор: монография. Тверь: ТвГТУ. 2013. 123 с.
2. Ермаков С.Ф. Влияние смазочных материалов и присадок на триботехнические характеристики твердых тел. Часть 2. Активное управление трением // *Трение и износ*. 2012 (33). № 3. С. 275–283.
3. Uhlmann E. Application of magnetic fluids in tribotechnical systems // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2002 (252). № 11. P. 336–340.
4. Болотов А.Н., Новиков В.В., Новикова О.О. Магнитные масла триботехнического назначения // *Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов*. Тверь: ТГУ. 2009. № 1. С. 5–9.
5. Болотов А.Н., Новиков В.В., Новикова О.О. Влияние присадок на триботехнические характеристики наноструктурных смазочных магнитных масел // *Трение и смазка в машинах и механизмах*. 2015. № 9. С. 43–47.
6. Щукин Е.Д. Влияние активной среды на механическую устойчивость и повреждаемость поверхности твердого тела // *Вестник Московского университета. Серия 2: Химия*. 2012. Т. 53. № 1. С. 50–72.
7. Энтелис С.Г., Бернинер М.Э. Смазочно-охлаждающие технологические средства для обработки металлов резанием. М.: Машиностроение. 1986. 352 с.
8. Щукин Е.Д., Перцов А.В., Амелина Е.А. Коллоидная химия. М.: Высшая школа. 2007. 445 с.
9. Болотов А.Н., Новикова О.О., Новиков В.В. Исследование триботехнических свойств наноструктурных магнитных смазочных масел с различными дисперсионными средами // *Трение и износ*. 2017 (38). № 2. С. 107–113.
10. Болотов А.Н., Новиков В.В., Новикова О.О., Горлов Д.И. Комплект оборудования для исследования физико-химических свойств нанодисперсных магнитных сред. Часть 2 // *Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел и деталей технологического и энергетического оборудования*. Тверь: ТвГТУ. 2014. Вып. 7. С. 85–89.

MECHANICAL PROPERTIES OF SURFACE OF LUBRICATED MAGNETIC OIL

A.N. BOLOTOV, Dr Sci, G.B. BURDO, Dr Sci,
O.O. NOVIKOVA, Cand Sci, V.V. NOVIKOV, Cand Sci

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

Here are presented results of an experimental study of the characteristics of the manifestation of adsorption plasticization of steel under the action of magnetic lubricating media in the presence of a non-uniform magnetic field with a gradient directed to the friction

surface. It was evaluated, that the plasticizing effect of a magnetic lubricating medium containing nanodispersed magnetite and a model medium having a similar basis, without magnetic dispersed particles. It has been established that the plasticizing effect significantly reduces the surface microhardness in depth and its value tends to saturation in a few hours. It is shown that magnetic oil, even in the absence of a magnetic field, more strongly plasticizes the surface than model oil. The imposition of a non-uniform magnetic field with a gradient directed to the surface of the steel leads to an increase in the plasticizing effect of the magnetic oil. An assessment is made of the effect of plasticizing surfaces lubricated with magnetic oil on their frictional interaction, which consists in increasing the lubricating properties of MM-PES magnetic oil containing nanodispersed magnetite than PES-5 model oil. The results of the study will allow further directional influence on the tribological characteristics of friction units with magnetic lubricating media.

Keywords: magnetic lubricants, surface effects, friction control, friction, wear.

ACKNOWLEDGMENTS

This work was financially supported by the Russian Foundation for Basic Research, project 18-48-690001.

REFERENCES

1. Bolotov A.N., Novikov V.V., Novikova O.O. Raschet i optimizaciya postoyannyh magnitov dlya special'nyh podshipnikovyyh opor: monografiya [Calculation and optimization of permanent magnets for special bearing bearing parts: monograph]. Tver: TSTU. 2013. 123 p.
2. Ermakov S.F. Influence of greases and additive compounds on tribotechnical characteristics of solids. Part 2. Active steering of friction. *Trenie i iznos*. 2012 (33). No 3, pp. 275–283. (In Russian).
3. Uhlmann E. Application of magnetic fluids in tribotechnical systems. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2002 (252). No 11, pp. 336–340.
4. Bolotov A.N., Novikov V.V., Novikova O.O. Magnetic oils of tribotechnical appointment. *Fiziko-himicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov*. Tver: TGU. 2009. No 1, pp. 59. (In Russian).
5. Bolotov A.N., Novikov V.V., Novikova O.O. Influence of additive compounds on tribotechnical characteristics of nanostructural grease magnetic oils. *Trenie i smazka v mashinah i mekhanizmah*. 2015. No 9, pp. 43–47. (In Russian).
6. Schukin E.D. Influence of the active environment on mechanical stability and damageability of surface of solid. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 2: Khimiya*. 2012. V. 53. No 1, pp. 50–72. (In Russian).
7. Ehntelis S.G., Berniner M.Eh. Smazochno-ohlazhdayushchie tekhnologicheskie sredstva dlya obrabotki metallov rezaniem [The lubricant cooling technological means for processing of metals cutting]. M.: Mashinostroenie. 1986. 352 p.
8. Schukin E.D., Percov A.V., Amelina E.A. Kolloidnaya khimiya [Colloid chemistry]. M: Vysshaya shkola. 2007. 445 p.
9. Bolotov A.N., Novikova O.O., Novikov V.V. Probe of tribotechnical properties of nanostructural magnetic grease oils with various dispersive environments. *Trenie i iznos*. 2017 (38). No 2, pp. 107–113. (In Russian).
10. Bolotov A.N., Novikov V.V., Novikova O.O., Gorlov D.I. Set of the equipment for probe of physical and chemical properties of nanodisperse magnetic environments. Part 2. *Mekhanika i fizika processov na poverhnosti i v kontakte tverdyh tel i detalej tekhnologicheskogo i ehnergeticheskogo oborudovaniya*. Tver: TvGTU. 2014. No 7, pp. 85–89. (In Russian).

СИНТЕЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА СТРУКТУРНОЙ МОДЕЛИ ДЕТАЛИ

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

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

Предприятия, специализирующиеся на выпуске машиностроительной продукции в нашей стране, сталкиваются с проблемой существенного сокращения производства. Увеличить объем производства возможно только за счет расширения номенклатуры нетрадиционных изделий, что требует ускорения технологической подготовки. Повысить эффективность технологической подготовки в таких условиях можно за счет использования систем автоматизированного проектирования технологических процессов (САПР ТП), а также групповых технологий. Однако применение САПР ТП не всегда обеспечивает получение качественного решения, так как не все особенности производства могут быть учтены информационными системами. Для решения этой проблемы предлагается специальный алгоритм, позволяющий на основе анализа структурной модели конструкторско-технологических элементов детали получать технологический процесс с учетом особенностей используемого технологического оборудования. В условиях многономенклатурного производства высокая эффективность и требуемое качество продукции могут быть достигнуты только за счет групповых технологий и применения гибких производственных систем (ГПС), основанных на использовании станков с числовым программным управлением (ЧПУ), которые позволяют снизить затраты на переналадку при переходе на выпуск нового изделия.

Ключевые слова: технология машиностроения, автоматизация, технологическая подготовка производства, структурная модель, групповая технология, гибкие производственные системы.

ВВЕДЕНИЕ

Машиностроительные предприятия в условиях сокращения объема производства традиционной продукции вынуждены расширять номенклатуру выпускаемых деталей за счет привлечения дополнительных заказов на изготовление ранее не освоенных изделий. В таких условиях в большинстве случаев возникает проблема разработки технологических процессов, обладающих достаточной гибкостью. Кроме того, при изготовлении деталей малой серийности традиционно используются универсальные станки, характеризующиеся недостаточной эффективностью и качеством изготовления продукции. Эффективность многономенклатурного производства в настоящее время может быть повышена только за счет групповых технологий, основанных на применении станков с числовым программным управлением, которые обладают требуемой гибкостью и производительностью [1–3]. При реализации такого подхода актуальной является задача автоматизированного структурного синтеза технологического процесса с использованием САПР ТП для получения технологических маршрутов на основе анализа структурной модели детали и свойств конструкторско-технологических элементов (КТЭ). Однако в большинстве используемых в настоящее время систем автоматизированного проектирования технологических процессов не решена на должном уровне проблема формирования сквозного

технологического маршрута на деталь [4, 5]. Решить данную проблему можно с помощью специальных алгоритмов, позволяющих формировать технологический процесс автоматизированным методом на основе анализа структуры детали и свойств КТЭ.

РАЗРАБОТКА СТРУКТУРНОЙ МОДЕЛИ ДЕТАЛИ

Разработка структурной модели детали начинается с анализа конструкции детали. В процессе анализа необходимо выявить основные параметры детали, влияющие на положение заготовки в процессе обработки, на способ получения поверхностей и доступ обрабатывающего инструмента. Исходя из этого, деталь можно структурно поделить на подсистемы нескольких уровней.

Например, детали типа *Вал* можно условно разделить на две подсистемы первого уровня: левая сторона и правая сторона. Это связано с тем, что при изготовлении валов в большинстве случаев обработка проводится сначала с одной стороны, а затем, после переустановки детали, с другой. Здесь необходимо учитывать последовательность обработки поверхностей конкретной детали и способ ее установки. Существует несколько правил разделения детали на обрабатываемые стороны. Чаще всего деталь типа *Вал* условно делят на две стороны по максимальному диаметру какой-либо поверхности. При этом с точки зрения технологичности желательно, чтобы время обработки сторон по возможности было близким. Более важна возможность установки и закрепления детали с учетом требуемой точности базирования.

Подсистемы первого уровня (левая и правая сторона) делятся на подсистемы второго уровня в зависимости от главного формообразующего элемента, с которым связана форма обрабатываемой поверхности и, соответственно, вид используемого технологического оборудования. Для деталей типа *Вал* главным формообразующим движением является вращение детали вокруг своей оси, поэтому для ее обработки используются токарные и круглошлифовальные станки, в зависимости от требуемой точности поверхностей. Вместе с этим необходимо учитывать наличие прочих КТЭ (таких как лыски, пазы, несоосные отверстия и др.), которые получают другими способами обработки. С точки зрения понимания структуры детали подсистемы второго уровня лучше обозначать в соответствии с их формой (цилиндры, конусы, шпоночные пазы, торцы и др.).

Количество уровней подсистем может быть различным, в зависимости от сложности конструкции детали, но на самом нижнем уровне структурной модели детали находятся неделимые КТЭ – простейшие поверхности с набором определенных свойств (в большинстве случаев это размеры, точность, шероховатость поверхностей, отклонения их формы, а также отклонения расположения поверхностей). Отображать все эти свойства КТЭ в структурной модели сложно, но большинство их косвенно связаны между собой. Например, для цилиндрических поверхностей с точностью по 6–7-му качеству шероховатость поверхностей может быть в пределах $Ra_{1,6-0,2}$, в зависимости от требований к детали. Достигается эта шероховатость за такое же количество переходов и в конечном счете зависит от инструмента и режимов резания, т.е. от параметров обработки, и на структуру технологического процесса не влияет. Отклонения формы обрабатываемых поверхностей связаны с допусками на ее размеры, поэтому тоже могут определяться в зависимости от качества точности. Следовательно, в большинстве случаев номер качества позволит с достаточной точностью определить необходимое количество переходов для достижения требуемых параметров детали, т.е. структуру технологического процесса (ТП).

Обозначение КТЭ можно представлять в виде: *1.2.3 КШ.Цилб*, где цифры в начале отражают структурные свойства элемента: *1* – первый структурный уровень (обрабатываемая сторона детали), *2* – второй структурный уровень (главная формообразующая группа, в данном случае цилиндр), *3* – третий структурный уровень (номер элемента, входящего в формообразующую группу), цифра *б* в конце обозначения – квалитет точности основного размера элемента. Буквы до точки описывают метод обработки элемента, после точки – тип КТЭ.

Рассмотрим пример структурного анализа детали типа *Вал*. Конструкция шлицевого вала (рис. 1) такова, что диаметральные размеры всех его ступеней уменьшаются от середины к торцам. Наибольший диаметральный размер составляет 54 мм, линейный – 250 мм.

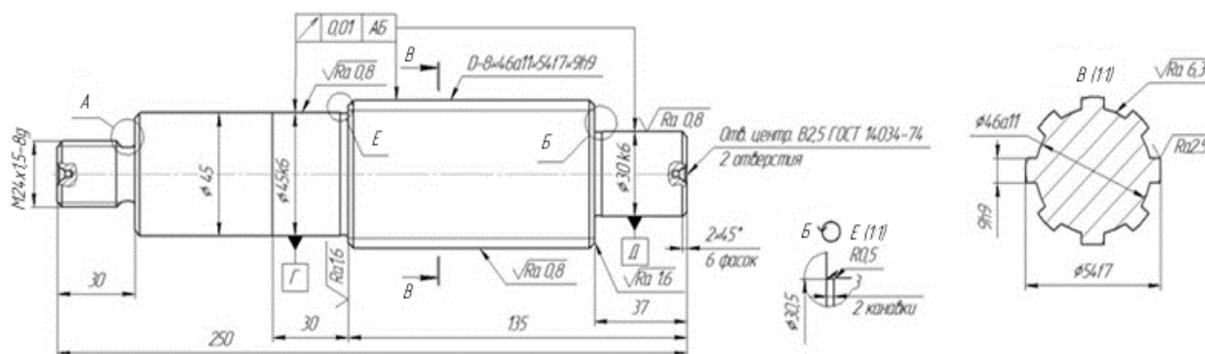


Рис. 1. Чертеж шлицевого вала

Структурно вал можно разложить на системы разных уровней. Первый структурный уровень связан со стороной обрабатываемой детали (левая сторона – *1*, правая сторона – *2*).

Затем идет второй структурный уровень. Структурная группа *1.1* – торец с центровым отверстием – получается на фрезерно-центровальной операции за два перехода (первый – фрезерование торца, второй – сверление центрального отверстия). Структурная группа *1.2* включает в себя на первом этапе обработки сам цилиндр, который обрабатывается несколько раз, и правый торец. Аналогично обозначены другие структурные подсистемы второго уровня (рис. 2).

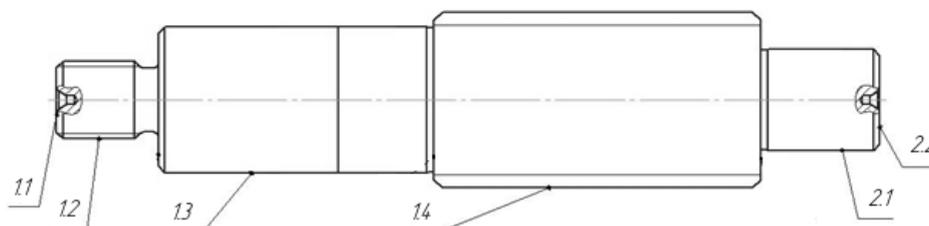


Рис. 2. Основные структурные группы второго уровня шлицевого вала

Объединение КТЭ в структурные подсистемы второго уровня должно производиться с точки зрения обработки на одной операции (т.е. на одном станке с одной установкой) или последовательности обработки.

На третьем структурном уровне детали находятся КТЭ, обладающие как своими свойствами, так и свойствами более высоких структурных уровней. Например, КТЭ *1.3.2 КШ.Цилб* – цилиндр 6-го квалитета, входящий в структурную подсистему вто-

рого уровня 1.2 (Цилиндр) принадлежащей структурной системе первого уровня 1 (Левая сторона). Буквы перед точкой обозначают вид окончательной операции изготовления элемента, получаем его из плана обработки на КТЭ (операции: КШ – кругло-шлифовальная, ФЦ – фрезерно-центровальная, Т – токарная, Ф – фрезерная и т.д.).

Проведя структурный анализ детали, получим структурную модель, отражающую все свойства шлицевого вала (рис. 3).

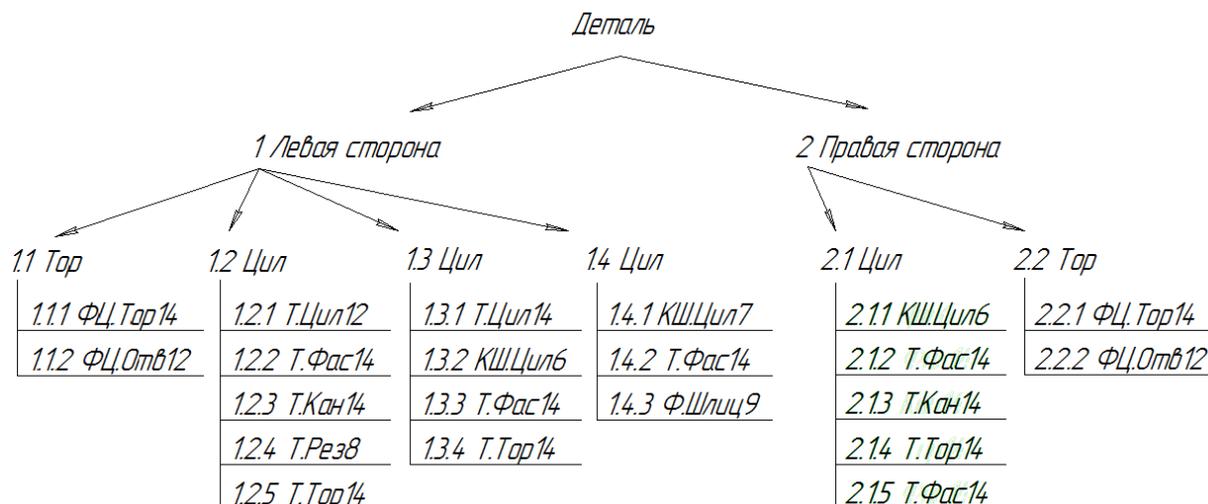


Рис. 3. Структура КТЭ детали шлицевой вал

Аналогично проводится структурный анализ других деталей, входящих в группу, и формируется комплексная деталь, содержащая все КТЭ деталей. На основе анализа структуры КТЭ группы формируется групповой технологический маршрут, представляющий собой набор операций с выбранным технологическим оборудованием, отвечающим требованиям групповой обработки.

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ДЕТАЛИ

Групповой ТП основывается на принципах серийного производства, но с учетом возможности быстрой переналадки оборудования на выпуск новой партии деталей. Если рассматривать групповой ТП для изготовления деталей типа *Вал*, то структура его в целом сходная для всех деталей [6, 7]. Сначала производится подготовка технологических баз, затем черновая и чистовая обработка, изготовление соответствующих КТЭ (фрезерование шпоночных пазов, шлицев, зубчатых венцов, сверление несоосных отверстий и др.). Потом (при необходимости) осуществляется термообработка, после чего выполняются отделочные операции с использованием шлифовального оборудования. Таким образом, укрупненная структура ТП известна.

Оборудование для реализации групповой технологии подбирается исходя из условий достаточной гибкости и эффективности [8–10]. Таким требованиям отвечают станки с ЧПУ. Для подготовки технологических баз в многономенклатурном производстве в настоящее время применяются фрезерно-центровальные станки с ЧПУ, которые оснащены управляемыми по программе устройствами для обработки, установки и закрепления однотипных деталей. Например, станок для подготовки технологических баз NPF120N используется для обработки с двух сторон торцов, сверления центровых отверстий и обтачивания цилиндрических крайних поверхностей

(длиной до 50 мм). Управление основными рабочими органами станка осуществляется ЧПУ, поэтому время на переналадку при переходе к новой партии деталей относительно небольшое. Этот станок может встраиваться в ГПС и подключаться к информационным промышленным сетям.

На следующем этапе ТП выполняется токарная черновая обработка. В большинстве случаев для этого не требуется оборудование с широкими технологическими возможностями, так как форма обрабатываемых поверхностей простая (цилиндры, торцы, конуса и др.). В то же время станки (например, ТС1625Ф3), используемые на черновых операциях, должны быстро переналаживаться, обладать высокой мощностью и жесткостью, что обеспечивает удаление больших припусков за один проход. Вследствие значительных нагрузок точность обработки относительно невысокая, обычно в пределах 14–12-го квалитетов. На токарной чистовой операции обычно совмещается получистовая и чистовая обработка (соответственно 11-й и 9-й квалитет). Обработка проводится на станках с ЧПУ за несколько проходов с получением фасок, канавок различной формы, резьбы и других элементов, следовательно, оборудование должно обеспечивать возможность использования широкой номенклатуры инструментов (например, ТС1720Ф4).

На следующем этапе производится изготовление шлицев, зубчатых венцов, пазов, отверстий и др. Для этих целей можно использовать вертикально-фрезерные обрабатывающие центры, например ФС85МФ3. Обрабатывающий центр может проводить несколько различных видов обработки: фрезерование, растачивание, сверление, резьбонарезание и др. Возможности станка расширяются с помощью цифровой делительной головки. В этом случае станок может изготавливать зубчатые венцы и шлицы методом копирования.

Если в рассматриваемой группе деталей присутствуют в большом количестве валы-шестерни, то для повышения эффективности обработки лучше использовать универсальные зубофрезерные станки с ЧПУ (например, 53С11Ф5 для изготовления цилиндрических и червячных зубчатых колес в условиях мелкосерийного производства).

Для выполнения отделочных операций в многономенклатурном производстве необходимо применять круглошлифовальные станки с ЧПУ, такие как RSM 500 CNC. Назначение таких станков – обработка шлифованием наружных цилиндрических, конических поверхностей в разном их сочетании. Шлифование может проводиться методом врезания или продольным шлифованием с последовательной обработкой нескольких поверхностей.

Количество и технологические возможности оборудования в конкретных условиях производства могут значительно отличаться, поэтому на этапе технологического проектирования следует закрепить за каждым станком возможные КТЭ, что позволит в дальнейшем автоматически получать маршрут обработки на конкретную деталь.

Например, для рассматриваемой детали за фрезерно-центровальным станком нужно закрепить следующие КТЭ: торцевую поверхность *XXXФЦ.ТОР14*, отверстие центровое *XXXФЦ.Отв12*, крайние цилиндрические ступени *XXXФЦ.Цил14*. При этом сторону обработки детали учитывать не нужно, так как обработка ведется сразу с обеих сторон. Аналогично распределяются КТЭ на другие операции, но с учетом положения детали при обработке (*1 – Левая сторона, 2 – Правая сторона*). Изменение положения обработки свидетельствует о переустановке детали, а это значит, что выполняется другая операция. Далее в соответствии с закрепленными КТЭ за станками получается технологический маршрут на деталь в зависимости от структурной модели детали.

При разработке технологического процесса эффективно использовать САПР ТП, так как с помощью их можно повысить качество и существенно сократить время технологического проектирования. Например, при проектировании в системе «Вертикаль» в окне «КТЭ» создается структурная модель детали по приведенным выше правилам. Для КТЭ описываются свойства (размер с точностью, шероховатость) и автоматически формируются варианты планов обработки. Из них выбирается вариант, соответствующий структуре группового техпроцесса. Выбранный план обработки с межоперационными размерами позволяет определить необходимый набор операций для получения данного КТЭ и сформировать его обозначение в окончательном виде по предложенной выше методике. В таблице представлены технологические параметры КТЭ 1.3.2 КШ.Цил6 – цилиндра, выполняемого по 6-му качеству.

Изменение свойств и межоперационных размеров для КТЭ 1.3.2 КШ.Цил6

КТЭ	Квали-тет	Наименование перехода	Размер, получаемый на переходе, мм	Припуск, мкм		
				$2Z_{\max}$	$2Z_{\min}$	$2Z_{\text{ном}}$
1.3.2 Т.Цил14	14	Черновое точение	$\varnothing 46,3_{-0,62}$	5 410	3 510	4 130
1.3.2 Т.Цил11	11	Получистовое точение	$\varnothing 45,45_{-0,25}$	1 100	230	850
1.3.2 Т.Цил9	9	Чистовое точение	$\varnothing 45,25_{-0,062}$	300	80	200
1.3.2 КШ.Цил7	7	Предварительное шлифование	$\varnothing 45,13_{-0,025}$	145	60	120
1.3.2 КШ.Цил6	6	Окончательное шлифование	$\varnothing 45_{+0,018}^{+0,002}$	128	50	118

Получив планы обработки для соответствующих элементов, можно объединить отдельные переходы из планов обработки КТЭ в операции на основе предлагаемой методики в зависимости от типа операции (например, токарная черновая операция для элементов 1.2.1 Т.Цил14, 1.2.5 Т.Тор14, 1.3.1 Т.Цил14, 1.3.2 Т.Цил14, 1.3.4 Т.Тор14, 1.4.1 Т.Цил14) и положения детали при обработке (в данном случае положение 1 – Левая сторона). Процесс создания структуры группового ТП зависит от большого количества параметров (структурных моделей КТЭ деталей группы, используемого технологического оборудования, применяемой оснастки и многих других условий), поэтому для каждого конкретного случая необходимо проводить предварительный анализ возможных вариантов решений на имитационных моделях.

ВЫВОДЫ

Групповые технологические процессы изготовления деталей малой серийности позволяют повышать эффективность многономенклатурного производства за счет сокращения времени на переналадку станков [11–14]. В то же время подготовка к производству детали малой серийности оказывает существенное влияние на стоимость и качество изделия. Отчасти эту проблему помогают решить САПР ТП, однако они не всегда обеспечивают получение готового решения на высоком технологическом уровне, так как имеют ряд ограничений. Разработанная методика построения технологического процесса на основе анализа структурной модели детали позволяет упростить процесс получения технологического маршрута

автоматизированным методом за счет формального алгоритма, который может быть реализован с помощью информационных систем, что обеспечивает повышение качества проектирования и снижение затрат времени на подготовку к производству.

В условиях, когда машиностроительные предприятия снижают объем производства традиционной продукции, возрастают издержки при использовании типовых решений. Использование ГПС на основе групповых технологий и современные подходы к проектированию технологических процессов для деталей малой серийности позволят обеспечить требуемую эффективность изготовления и высокое качество продукции [15].

ЛИТЕРАТУРА

1. Горлов И.В., Осипов В.С. Структурный синтез технологических процессов в условиях группового проектирования // *Вестник Тверского государственного технического университета*. 2017. № 2 (32). С. 71–76.
2. Горлов И.В., Полетаева Е.В., Калинин Н.А. Групповая технология как основа автоматизации широкономенклатурного производства // *Вестник Тверского государственного технического университета*. 2016. № 1 (29). С. 59–65.
3. Горлов И.В., Полетаева Е.В., Рахутин М.Г. Использование групповых технологий при производстве и ремонте торфяных машин // *Механическое оборудование металлургических заводов*. 2017. № 2 (9). С. 22–26.
4. Литовка Ю.В. Автоматизация технологической подготовки производства. Тамбов: Тамбовский государственный технический университет. 2003. 33 с.
5. Чижов М.И., Бредихин А.В. Разработка подхода к автоматизации технологической подготовки производства в PLM системе Teamcenter // *Вестник Воронежского государственного технического университета*. 2011. Т. 7, № 12-1. С. 24–26.
6. Новоселецкий Б.В., Редько Р.Г., Редько О.И. Особенности технологии обработки деталей типа тел вращения на гибких автоматизированных линиях // *Наукові нотатки*. 2014. № 47. С. 125–130.
7. Аскалонова Т.А., Леонов С.Л., Ситников А.А. Организация групповой технологии в гибких производственных системах // *Вестник современных технологий*. 2016. № 1 (1). С. 4–9.
8. Мещерякова В.Б., Стародубов В.С. Металлорежущие станки с ЧПУ. Сер.: Бакалавриат: учеб. пособие. М.: НИЦ ИНФРА-М, 2015. 336 с.
9. Сивцев Н.С. Приспособления для многооперационных станков с ЧПУ: учеб. пособие для студентов вузов: в 2 частях; ред. И.В. Ганеева. Часть 1. Системы переналаживаемых приспособлений. Ижевск: Ижевский государственный технический университет им. М.Т. Калашникова. 2014. 96 с.
10. Пушинин В.Н., Ерохин И.А., Корнев Д.Ю., Скиба В.Ю. Станочное оборудование, основанное на компенсировании нескольких технологических операций // *Актуальные проблемы в машиностроении*. 2014. № 1. С. 245–255.
11. Синго С. Быстрая переналадка. Революционная технология оптимизации производства. Сер.: Модели менеджмента ведущих корпораций; пер. с англ. под ред. Ю. Адлера. М.: ЦентрОргПром. 2006. 343 с.
12. Мартынов Р.С. Сокращение времени переналадки оборудования как фактор повышения эффективности использования материальных ресурсов на предприятии // *Вестник Саратовского государственного социально-экономического университета*. 2011. С. 87–90.

13. Куприянова Т.М., Растимешин В.Е. Реализация технологии быстрой переналадки: российский опыт // *Методы менеджмента качества*. 2007. № 6. С. 4–9.

14. Звягина Е.А., Миронов А. Оптимизация процесса механической обработки детали на основе применения быстропереналаживаемого технологического оборудования // *Инновации, качество и сервис в технике и технологиях: сб. науч. трудов 4-й Международной научно-практической конференции. В 3 т.; отв. ред. Горохов А.А. Курск: ЗАО «Университетская книга». 2014. С. 224–229.*

15. Бухалков М.И., Кузьмин М.А., Павлов В.В. Особенности проектирования и организации группового производства в машиностроении // *Организатор производства*. 2010. Т. 47. № 4. С. 27–32.

SYNTHESIS BASED ON ANALYSIS OF A STRUCTURAL DETAIL MODEL FOR THE TECHNOLOGICAL PROCESS

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

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

Enterprises that specialize in the production of engineering products in our country are faced with the problem of a significant reduction in production. It is possible to increase the volume of production only by expanding the range of unconventional products; this requires accelerating technological preparation. It can increase the efficiency of technological preparation in such conditions through the use of computer design for technological processes (CAD TP) and using the group technologies. However, applying of CAD software does not always provide a quality solution, so that not all features of production can be taken into account by information systems. For solve this problem, a special algorithm is proposed for taking into account the features of the technological equipment used, which based on obtaining a technological process analysis of the structural model for technological elements of the part. In multifarious production conditions, high efficiency and requirements of product quality can be achieved only through group technologies and using of flexible production systems (FMS) based on the using of numerical control machines (CNC), which reduce the cost of changeover when switching to a new product.

Keywords: engineering technology, automation, technological preparation of production, structural model, group technology, flexible production systems.

REFERENCES

1. Gorlov I.V., Osipov V.S. Structural synthesis of technological processes in group design condition. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta*. Tver. 2017. No 2(32), pp. 71–76. (In Russian).

2. Gorlov I.V., Poletaeva E.V., Kalinin N.A. Group technology as the basis for the automation of wide-range production. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta*. Tver. 2016. No 1 (29), pp. 59–65. (In Russian).

3. Gorlov I.V., Poletaeva E.V., Rakhutin M.G. Use of group technologies in the production and repair of peat machines. *Mehanicheskoe oborudovanie metallurgicheskikh zavodov*. 2017. No 2 (9), pp. 22–26. (In Russian).

4. Litovka Yu.V. Automation of technological preparation of production. Tambov: Tambov State Technical University. 2003. 33 p.

5. Chizhov M.I., Bredikhin A.V. Development of an approach to the automation of technological preparation of production in the Teamcenter PLM system. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2011. V. 7, No 12-1, pp. 24–26. (In Russian).
6. Novoseletsky B.V., Redko R.G., Redko O.I. Features of the technology of processing parts such as bodies of revolution on flexible automated lines. *Naukovi notatky*. 2014. No 47, pp. 125–130. (In Ukraine).
7. Askalonova T.A., Leonov S.L., Sitnikov A.A. Organization of group technology in flexible production systems. *Vestnik sovremennyih tekhnologiy*. 2016. No 1 (1), pp. 4–9. (In Russian).
8. Meshcheryakova V.B., Starodubov V.S. Metal-cutting machines with CNC Ser. Undergraduate: study guide. Moscow. NITS INFRA-M. 2015. 336 p. (In Russian).
9. Sivtsev N.S. Adaptations for multioperational CNC machines: a manual for university students: in 2 parts Editor: I.V. Ganeeva. Part 1. Systems of adjustable devices. Izhevsk: Izhevskiy gosudarstvennyy tekhnicheskiy universitet im. M.T. Kalashnikova. 2014. 96 p. (In Russian).
10. Pushinin V.N., Erokhin I.A., Kornev D.Yu., Skiba V.Yu. Machine-tool equipment based on compensating for several technological operations. *Aktualnyie problemy v mashinostroenii*. 2014. No 1, pp. 245–255. (In Russian).
11. Shingo S. Quick changeover. Revolutionary optimization technology production. Series "Models of management of leading corporations." Translation from English ed. Y. Adler. Moscow, CenterOrgProm. 2006. 343 p. (In Russian).
12. Martynov R.S. Reduction of equipment changeover time as a factor improve the efficiency of use of material resources in the enterprise. *Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo sotsialno-ekonomicheskogo universiteta*. 2011, pp. 87–90. (In Russian).
13. Kupriyanov T.M., Rastameshin V.E. Implementing a quick changeover technology: Russian experience // *Methods of quality management*. 2007. No 6, pp. 4–9. (In Russian).
14. Zvyagina E.A., Mironov A. Optimization of the process of machining parts based on the use of fast-process equipment. *Innovatsii, kachestvo i servis v tekhnike i tekhnologiyah*. Collection of scientific papers of the 4th International Scientific and Practical Conference: in 3 volumes. Responsible editor Gorokhov A.A. Publisher: Closed Joint-Stock Company "Universitetskaya Kniga" (Kursk), 2014, pp. 224–229. (In Russian).
15. Bukhalkov M.I., Kuzmin M.A., Pavlov V.V. Features of the design and organization of group production in mechanical engineering. *Organizator proizvodstva*. 2010. V. 47. No 4, pp. 27–32. (In Russian).

СПОСОБ ИЗМЕРЕНИЯ ПАЗА И СТУПИЦЫ КОРПУСНОЙ ДЕТАЛИ

А.П. АРХАРОВ, канд. техн. наук, Д.Ю. ЗЫКОВ

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

Приведен способ измерения высоты ступицы, ширины пазы и симметричности пазы относительно торцов ступицы корпусной детали. На установочную плоскость устанавливается одним из торцов ступицы объект измерения и стойку с размещенным на ней прибором с измерительным щупом и тремя индикаторами, настроенными по образцовой детали. При установке стойки обеспечивают контакт измерительного щупа с одной из боковых поверхностей проверяемого пазы путем перемещения прибора по стойке, контакт измерительного наконечника первого индикатора с другой боковой поверхностью измеряемого пазы, а контакты измерительных наконечников второго и третьего индикаторов – соответственно с другим торцом ступицы и с установочной плоскостью. Снимают показания индикаторов. Затем определяют отклонения искомых параметров от настроенных значений: высоты ступицы – по сумме показаний второго и третьего индикаторов; ширины пазы – по показанию первого индикатора; симметричности пазы относительно торцов ступицы – по полуразности между показанием второго индикатора и суммой показаний первого и третьего индикаторов. Предлагаемый способ позволяет повысить производительность измерения и расширить технологические возможности и может быть использован на машиностроительных предприятиях при измерении параметров корпусных деталей, например корпуса буксы вагона.

Ключевые слова: способ, измерение, расположение, паз, ступица, деталь, производительность.

ВВЕДЕНИЕ

В некоторых корпусных деталях содержатся конструктивные элементы в виде пазов, не сопряженных с отверстием детали. Так, в корпусе буксы скоростного вагона паз выполнен на наружной поверхности и его расположение задано зависимым допуском симметричности относительно торцов ступицы. Это допуск зависит от действительных отклонений ширины пазы и высоты ступицы. Контроль зависимого допуска расположения пазы относительно плоскостей выполняют с помощью листового комплексного калибра [1]. Такой калибр проектируется проходным. Он позволяет оценить изделие по признаку «годное» или «брак», не устанавливая действительного отклонения расположения. Контролю симметричности предшествует контроль размеров ширины пазы и высоты ступицы. Это позволяет предварительно отбраковывать изделие по размерам поверхностей. При контроле симметричности изделие считается годным, если калибр входит в него по всем контролируемым параметрам. Существенным недостатком такого способа контроля является невозможность измерения действительных значений симметричности, которые необходимы для первоначальной настройки оборудования, а также для ее корректировки при изготовлении партии деталей. Кроме того, контроль трех параметров, не совмещенный по времени, снижает производительность.

Согласно каталогу измерительных средств, предлагаемых для реализации компанией «ИНТРА ТУЛ», имеется портальная координатно-измерительная машина (КИМ), например PRIMUS Mora Metrology [2]. С помощью такой КИМ может быть реализована задача контактного измерения параметров трехмерных деталей, в том числе детали в виде корпуса буксы. Деталь помещают на ее стол, ориентируют ее в направлении одной из координатных осей и измеряют координаты отдельных точек базовой и измеряемой поверхностей. Затем с помощью программного обеспечения определяют интересующие параметры [3]. Однако, обладая высокой точностью, такие средства измерения отличаются высокой стоимостью и применяются в измерительных лабораториях и пунктах ОТК.

Существует способ измерения параметров паза, не сопряженного с отверстием детали [4, 5]. Объект измерения базируют в наклонном корпусе путем установки его отверстием на два центрирующих пальца, обеспечивая при этом контакт измерительного щупа с одной из боковых поверхностей проверяемого паза. Выверяют взаимное угловое положение объекта измерения и наклонного корпуса возвратно-поворотными движениями объекта на центрирующих пальцах и щупа со штоком вокруг оси упомянутого штока. Возвратно-поворотные движения щупа осуществляют в плоскости, параллельной продольным осям центрирующих пальцев, достигая при этом неизменности показаний отсчетной головки при касании измерительного щупа боковой поверхности в двух крайних точках в направлении глубины паза. Снимают первый отсчет. Вводят щуп в контакт с другой боковой поверхностью паза и снимают второй отсчет. Поворачивают щуп вокруг оси, добиваясь его центрирования с рабочими поверхностями установочной призмы, после чего снимают третий отсчет. По разнице первых двух отсчетов и с учетом диаметра щупа определяют ширину паза, а по полуразности двух размахов, вычисленных соответственно по разностям первого и третьего, второго и третьего отсчетов, – отклонение от симметричности.

Однако указанным способом измеряется симметричность паза относительно оси отверстия, а не относительно торцов ступицы. Кроме того, не измеряется высота ступицы, а измерение двух параметров выполняется последовательно.

Цель настоящей работы – разработка способа контроля ширины паза, высоты ступицы и симметричности паза относительно торцов ступицы, обеспечивающего получение действительных значений симметричности и повышение производительности контроля.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В работе использован структурный анализ известных способов линейных измерений корпусных деталей, а при разработке нового способа применен принцип концентрации переходов при проектировании технологических процессов.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Решение поставленной задачи и технический результат достигаются в разработанном способе измерения, который заключается в следующем.

Объект измерения устанавливают одним из торцов ступицы на установочную плоскость. На эту плоскость устанавливают стойку с размещенным на ней прибором с измерительным щупом и тремя индикаторами, настроенными по образцовой детали. При этом обеспечивают контакт измерительного щупа с одной из боковых поверхностей проверяемого паза путем перемещения прибора по стойке, контакт измерительного наконечника первого индикатора с другой боковой поверхностью измеряемого паза, а контакты измерительных наконечников второго и третьего

индикаторов – соответственно с другим торцом ступицы и с установочной плоскостью. Снимают показания индикаторов. Определяют отклонение от настроенных значений следующих параметров: высоты ступицы – по разности показаний второго и третьего индикаторов; ширины паза – по показанию первого индикатора, симметричности паза относительно торцов ступицы – по полуразности между показанием второго индикатора и суммой показаний первого и третьего индикаторов.

На рисунке показана схема измерения разработанным способом. На установочную плоскость 1 устанавливают объект измерения 2 одним из торцов 3 ступицы. Устанавливают на установочную плоскость 1 стойку 4 с размещенным на ней прибором 5 с измерительным щупом 6 и индикаторами 7, 8 и 9, настроенными по образцовой детали. При установке стойки 4 обеспечивают контакт измерительного щупа 6 с одной из боковых поверхностей 10 паза путем перемещения прибора 5 по стойке, контакт измерительного наконечника 11 первого индикатора 7 с другой боковой поверхностью 12 проверяемого паза, контакт измерительного наконечника 13 второго индикатора 8 с другим торцом 14 ступицы и контакт измерительного наконечника 15 третьего индикатора 9 – с установочной плоскостью 1. Снимают показания Δ_1 , Δ_2 , Δ_3 соответственно на первом 7, втором 8 и третьем 9 индикаторах. Определяют отклонение от настроенного значения высоты ступицы по разности показаний Δ_2 и Δ_3 соответственно второго 8 и третьего 9 индикаторов.

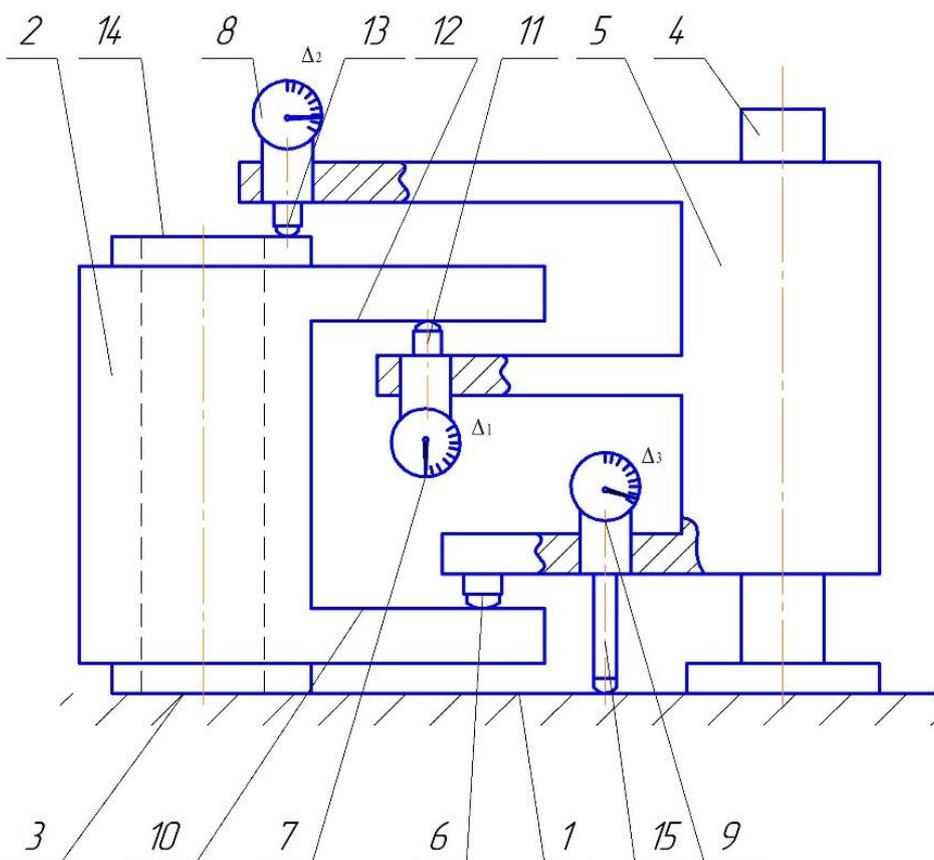


Схема осуществления способа измерения паза и ступицы корпусной детали

Определяют отклонение ширины паза от настроенного значения по показанию Δ_1 первого индикатора 7. Определяют отклонение от настроенного значения симметричности $\Delta_{\text{сим}}$ паза относительно торцов 3 и 14 ступицы по полуразности между показанием Δ_2 второго индикатора 8 и суммой показаний Δ_1 и Δ_3 соответственно первого 7 и третьего 9 индикаторов, т.е. $\Delta_{\text{сим}} = (\Delta_2 - (\Delta_3 + \Delta_3)) / 2$.

Сравнение разработанного способа с известным [5] показывает, что в известном решении необходима выверка взаимного углового положения объекта измерения и корпуса для последовательных измерений двух параметров: ширины паза и его симметричности относительно отверстия. В предложенном способе такая выверка отсутствует. Кроме того, предлагаемый способ обеспечивает дополнительно измерение высоты ступицы, а также одновременное измерение трех параметров: ширины паза, высоты ступицы и отклонение от симметричности паза. При этом последний параметр измеряется относительно торцов ступицы, что в известном способе невыполнимо. Таким образом достигается повышение производительности и расширение технологических возможностей способа измерения корпусной детали.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный структурный анализ способов измерения, используемых при производстве корпусных деталей, а также известных по литературным источникам и в патентной документации, позволил выявить их невысокую производительность и ограниченные технологические возможности. Разработанный способ позволяет устранить отмеченные недостатки. Способ может быть использован на машиностроительных предприятиях при измерении параметров корпусных деталей, например корпуса буксы вагона.

ЛИТЕРАТУРА

1. Палей М.А., Романов А.Б., Брагинский В.А. Допуски и посадки: справочник. В 2 частях. 9-е изд., СПб.: Политехника. 2009. Часть 1. 530 с.
2. Метрологическое обеспечение производства. Каталог компании «ИНТРА ТУЛ», с. 58–59; www.intratool.ru (дата обращения 20.10.2018).
3. Единая система допусков и посадок СЭВ в машиностроении и приборостроении: справочник. В 2 частях. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Изд-во стандартов. 1989. Т. 2: Контроль деталей, 208 с.
4. Архаров А.П. Измерение параметров паза, не сопряженного с отверстием детали // *Вестник Тверского государственного технического университета*. 2015. № 1 (27). С. 71–73.
5. Патент РФ 2488075. *Способ измерения параметров паза, не сопряженного с отверстием детали* // Архаров А.П. Заявл. 15.02.2012. Оpubл. 20.07.2013, Бюл. № 20.

METHOD OF MEASUREMENT OF GROOVE AND BODY PART HUB

A.P. ARKHAROV, Cand Sci, D.YU. ZYKOV

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

This article provides a method for measuring the hub height, the groove width, and the groove symmetry relatively to the body part hub butts. The object of the measurement is set on the hub butt on the installation plane. The rack with measuring probe and three

indicators tooled in model of piece is mounted on this plane. The rack mounting must provide: the measuring probe and groove side surface connection by the moving of the device along the rack, the measuring tip of the first indicator and another groove side surface connection, and the measuring tips of the second and the third indicators respectively to another hub butt and installation plane connections. Then one obtains the readings. Then the required deviations concerning the defaults can be measured: the hub height deviation by the sum of the second and third indication; the groove width deviation by the first indication; the groove symmetry with respect hub butts by the semidifference between second indication and the first and third indications sum. The method allows improving the measurement accuracy and the technological capabilities. This method can be used at engineering enterprises for measuring the parameters of such body parts, as axle box carriage, for example.

Keywords: method, measurement, location, groove, hub, piece, performance.

REFERENCES

1. Paley M.A., Romanov A.B., Braginskiy V.A. *Dopuski i posadki: Spravochnik v 2ch.* [Adjustments and allowances: directory in 2 parts]. 9-th edition. St. Peterburg: Politehnika. 2009, part 1, pp. 530.
2. *Metrologicheskoe obespechenie proizvodstva Katalog kompanii "INTRATUL"* [Metrological procuring of manufacturing "INTRA TUL" company directory], pp. 58–59; www.intratool.ru (date of access 20.10.2018) (In Russian).
3. *Edinaya Sistema dopuskov i posadok SEV v mashinostroenii i priborostroenii spravochnik v 2ch.* [Unified system of adjustments and allowances CMEA in mechanical engineering and instrument making. Directory in 2 parts]. Moscow: Izdatel'stvo standartov, 1989, part 2, 208 p.
4. Arkharov A.P. Method of measuring the parameters of groove, mismatched with part bore. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, No 1 (27), 2015, pp. 71–73. (In Russian).
5. Patent RF 2488075. *Sposob izmereniya parametrov paza, nesopryazhennogo s otverstiem detali* [Method of measuring the parameters of groove, mismatched with part bore]. Arkharov A.P. Declared 15.02.2012. Published 20.07.2013. Bulletin No 20. (In Russian).

АБРАЗИВНАЯ ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ СПЛАВА Ti6Al4V, ПОЛУЧЕННОГО ПО ТЕХНОЛОГИИ СЕЛЕКТИВНОГО ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОГО ПЛАВЛЕНИЯ

Л.Е. АФАНАСЬЕВА¹, канд. физ.-мат. наук, М.В. НОВОСЕЛОВА¹, канд. техн. наук,
А.И. ИВАНОВА², канд. физ.-мат. наук, Р.М. ГРЕЧИШКИН², д-р физ.-мат. наук

¹Тверской государственной технический университет, 170026, Тверь,
наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: ludmila.a@mail.ru

²Тверской государственной университет, 170100, Тверь, ул. Желябова, 33,
e-mail: Rostislav.Grechishkin@tversu.ru

Представлены результаты экспериментальных исследований триботехнических свойств сплава состава Ti6Al4V, полученного по технологии селективного электронно-лучевого плавления (СЭЛП). Проведены исследования микроструктуры с использованием методов оптической и растровой электронной микроскопии. Показано, что синтезированный сплав находится в закаленном состоянии с неравновесной тонкодисперсной $\alpha' + \beta$ -структурой, с шириной пластин α' -фазы $1,6 \pm 0,4$ мкм, β -фазы – $0,14 \pm 0,05$ мкм и практически не содержит пор. После горячего изостатического прессования в сплаве произошла полная перекристаллизация, размер пластинок α - и β -фазы увеличился примерно в два раза. Горячее изостатическое прессование не приводит к увеличению плотности и микротвердости, способствует снижению абразивной износостойкости сплава из-за огрубления микроструктуры. Благодаря структурному фактору, сплав Ti6Al4V, полученный по технологии СЭЛП, обладает повышенной абразивной износостойкостью.

Ключевые слова: сплавы титана, селективное электронно-лучевое плавление, абразивная износостойкость, горячее изостатическое прессование.

ВВЕДЕНИЕ

Сплавы на основе титана обладают малой плотностью, высокой удельной прочностью, коррозионной стойкостью, значительной прочностью при повышенных (до 600°C) температурах, что позволяет использовать их в ракетостроении и авиации, судостроении, химической промышленности, на предприятиях первичной металлургии, биологическом и медицинском приборостроении и во многих других отраслях. Сдерживающим фактором в повышении эффективного использования сплавов титана является ряд нерешенных проблем. Неоднородность химического состава, структуры, свойств и наличие металлургических дефектов в слитках, несовершенство технологии производства некоторых полуфабрикатов, большие припуски на механическую обработку обуславливают низкий коэффициент использования материала и высокую стоимость технологических процессов [1–3].

Применение аддитивных технологий при изготовлении изделий из сплавов титана позволяет минимизировать некоторые из перечисленных выше недостатков, при этом значительно сокращается время и стоимость выпуска продукции [4–17]. В настоящее время наиболее широкое распространение в мире получили технологии СЭЛП и селективного лазерного плавления (СЛП), основанные на избирательном плавлении слоя порошка в вакууме электронным лучом или в среде защитного газа лазерным лучом. Для получения требуемого комплекса свойств синтезируемых материалов необходимы детальные данные о закономерностях изменения их

микроструктуры и фазового состава на различных этапах производства. Цель настоящей работы – исследовать микроструктуру и триботехнические свойства сплава Ti6Al4V, полученного по технологии СЭЛП и горячего изостатического прессования (ГИП).

МЕТОДЫ ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для послойного электронно-лучевого плавления опытных образцов использовали порошок сплава Ti6Al4V (аналог – сплав марки ВТ6 ГОСТ 19807-91), изготовленный методом центробежного диспергирования быстровращающейся литой заготовки высокотемпературной плазменной струей (PREP). На рис. 1 представлено изображение гранул, полученное с помощью растрового электронного микроскопа (РЭМ). В табл. 1 представлен химический состав используемого порошка.

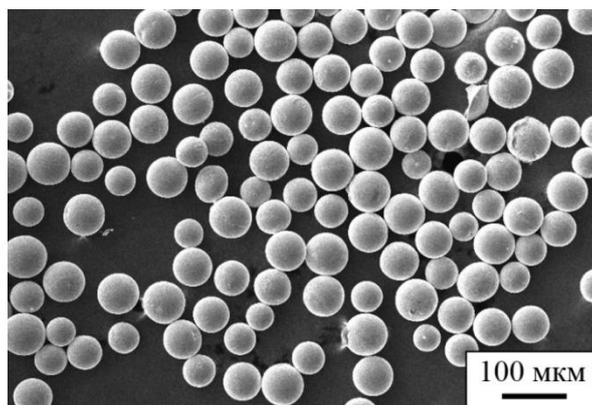


Рис. 1. РЭМ-изображение гранул сплава Ti6Al4V

Таблица 1. Химический состав порошка сплава Ti6Al4V (% масс.)

Al	V	C	Fe	O	N	H	Ti
6,03	4,0	0,03	0,1	0,15	0,01	0,003	Основа

По технологии СЭЛП на установке Arcam A2 изготовлены опытные образцы размером 70×20×15 мм. На подложку с помощью плоского ножа наносили и равномерно выравнивали по всей площади слой гранул толщиной ~100 мкм. Обработку электронным лучом проводили в два приема. Сначала выполняли предварительный подогрев слоя порошка, при этом происходило частичное спекание, что необходимо для удержания гранул при действии электромагнитных сил при повторной обработке. Затем слой порошка расплавляли по заданному сечению электронным лучом, после чего платформа опускалась на высоту наплавленного слоя, засыпался новый слой порошка и процесс повторялся. Синтез происходил в вакуумной камере при давлении остаточных газов $\sim 1,3 \cdot 10^{-3}$ Па. Часть образцов после СЭЛП подвергали горячей изостатической обработке в газостате HIRP70/150-200-1300 по режиму: температура нагрева 930°C, давление в рабочей камере 100 МПа, время выдержки 2 часа.

Исследования микроструктуры проводили в двух сечениях: в плоскости сканирования электронного луча (продольное сечение) и в перпендикулярной плоскости (поперечное сечение) с помощью металлографического микроскопа Carl Zeiss Axio Vert.A1MAT и РЭМ JEOL JSM-6610LV. Рентгеноспектральный микроанализ выполняли на энергодисперсионном спектрометре Oxford INCA Energy 350. Фазовый состав сплава определяли методом рентгеноструктурного анализа на дифрактометре Bruker D8 Advance. Микротвердость измеряли по методу восстановленного отпечатка

на микротвердомере ПМТ-3 согласно ГОСТ Р 8.748-2011. Плотность образцов определяли методом гидростатического взвешивания в соответствии с ГОСТ 25281-82 (ASTM B962-08).

Испытание на изнашивание проводили о закрепленный абразив по схеме *шар – плоскость*. В качестве контрообразца использовали стальной сферический наконечник с алмазным напылением (диаметр наконечника 1,3 мм, средний размер алмазных частиц ~25 мкм). К контакту прикладывали нагрузку в 50 г ($N = 0,49$ Н). Тангенциальные возвратно-поступательные перемещения контрообразца осуществлялись электромеханическим приводом с питанием от генератора импульсов с частотой $\nu = 20$ Гц. За один период путь трения составлял 8...12 мм. Каждый образец подвергался испытанию в течение $t = 11,5$ часов. Общий путь трения составлял $L_{тр} = 6\ 700 \dots 10\ 100$ м. С поверхности образцов перпендикулярно дорожке изнашивания были сняты профилограммы, по которым определяли ширину D и максимальную глубину h_{max} дорожки изнашивания. Рассчитывали стандартные характеристики (ГОСТ 27674-88):

- линейный износ за цикл I ;
- скорость изнашивания u ;
- линейную интенсивность изнашивания I_h ;
- объемную интенсивность изнашивания I_v .

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Сплав состава Ti6Al4V относится к двухфазным ($\alpha + \beta$)-сплавам [1–3]. На формирование его структуры и свойств решающее влияние оказывают фазовые превращения, связанные с полиморфизмом титана. Исходная β -фаза при первичной кристаллизации имеет столбчатую морфологию. Направление роста зерна совпадает с направлением синтеза детали, происходит рост β -титана непосредственно на зернах предыдущего слоя. Высота столбчатых зерен может достигать нескольких миллиметров [5].

На рис. 2 представлен пример дифрактограммы, в табл. 2 приведены результаты фазового анализа образцов, выполненного в двух взаимно перпендикулярных плоскостях: в плоскости сканирования электронного луча (продольное сечение) и в поперечном сечении.

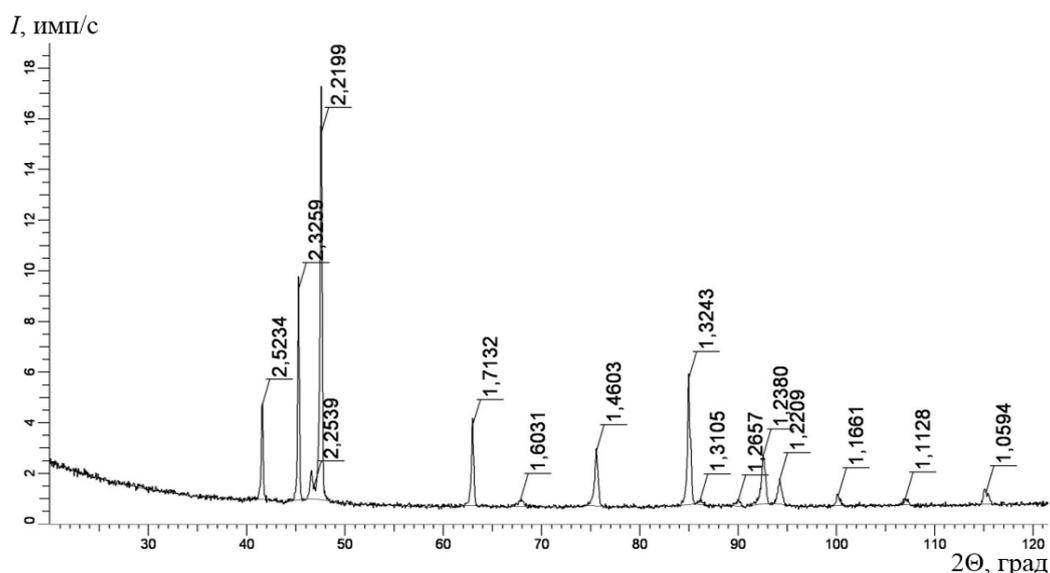


Рис. 2. Дифрактограмма образца Ti6Al4V, снятая в плоскости слоя

Таблица 2. Результаты фазового анализа образца сплава Ti6Al4V

В плоскости слоя		В направлении синтеза	
Межплоскостное расстояние, Å	Фаза, hkl	Межплоскостное расстояние, Å	Фаза, hkl
2,523 4	α -Ti (100)	2,528 6	α -Ti (100)
2,325 9	α -Ti (002)	2,329 2	α -Ti (002)
2,253 9	β -Ti (110)	2,264 1	β -Ti (110)
2,219 9	α -Ti (101)	2,222 2	α -Ti (101)
1,713 2	α -Ti (102)	1,714 3	α -Ti (102)
1,603 1	β -Ti (200)	1,603 4	β -Ti (200)
1,460 3	α -Ti (210)	1,460 8	α -Ti (210)
1,324 3	α -Ti (103)	1,324 5	α -Ti (103)
1,310 5	β -Ti (211)	1,265 3	α -Ti (200)
1,265 7	α -Ti (200)	1,238 0	α -Ti (112)
1,238 0	α -Ti (112)	1,220 9	α -Ti (201)
1,220 9	α -Ti (201)	1,166 4	α -Ti (004)
1,166 1	α -Ti (004)	1,112 3	α -Ti (202)
1,112 8	α -Ti (202)	1,059 4	α -Ti (104)
1,059 4	α -Ti (104)	1,324 5	α -Ti (103)

На дифрактограммах, снятых в плоскости слоя, выявляется три пика от β -титана, в то время как в поперечном сечении – только два. Отсутствие пика β -титана может быть связано с перераспределением интенсивностей и присутствием текстуры в образце. Фазовый состав и дисперсность частиц вторичной α -фазы зависят от скорости нагрева и охлаждения сплава во время синтеза. При послонном электронно-лучевом плавлении происходит локальный разогрев, плавление гранул и последующая высокоскоростная кристаллизация при очень быстром охлаждении со скоростью до 10^5 К/с [16, 17]. По данным работы [16] в интервале температур от ~ 1900 до $\sim 700^\circ\text{C}$ происходит охлаждение сплава с очень высокими скоростями, затем идет выдержка в течение времени изготовления детали, так как во время синтеза образца температура в камере составляет около 700°C . После завершения процесса синтеза сплав медленно охлаждается. Температура полиморфного превращения в сплаве Ti6Al4V равна $995 \pm 20^\circ\text{C}$ [9], следовательно, условия охлаждения при изготовлении изделия способствуют образованию неравновесной α' -фазы.

С повышением скорости охлаждения сплава при кристаллизации размер α' -колоний и толщина α' -пластинок уменьшается. Повышается количество легирующих компонентов в α' -фазе, степень искажения кристаллической решетки возрастает [1, 2]. Формируется тонкая структура с высокой дисперсностью α' - и β -фазы (рис. 3а, в). По данным металлографического анализа в сплаве, полученном по технологии СЭЛП, формируется микроструктура с шириной пластин α' -фазы $1,6 \pm 0,4$ мкм, β -фазы – $0,14 \pm 0,05$ мкм.

Технология СЭЛП формирует в сплаве тонкую микроструктуру с низким уровнем пористости. Выявлены отдельные сферические поры диаметром от 2 мкм и менее в количестве около 0,1 % по объему. В работе [16] отмечается, что с помощью стандартного горячего изостатического прессования титановых сплавов можно не только успешно устранить имеющиеся поры, но и в целом повысить комплекс механических свойств. Сущность ГИП состоит в одновременном воздействии на помещаемую в газостат заготовку высоких температур и изостатического давления инертным газом. Технология ГИП уже зарекомендовала себя как эффективная для

получения заготовок деталей из гранул, для улучшения качества отливок из сплавов на основе никеля, титана, алюминия, сталей [18, 19]. Оптимальный режим ГИП должен обеспечить полное устранение усадочной пористости, прохождение процесса дегазации, отсутствие огрубления структуры, что в целом способствует повышению механических свойств материала.

Сплав при газостатировании подвергался всестороннему сжатию при температуре 930°C, что равноценно отжигу, стабилизирующему фазовый состав. Применяемый инертный газ аргон, содержащий по ГОСТ 10157-99 до 0,0007 масс. % кислорода, вызывает окисление поверхности образцов, поэтому подвергаемые ГИП детали из сплавов титана должны иметь припуск, который затем снимается механической обработкой.

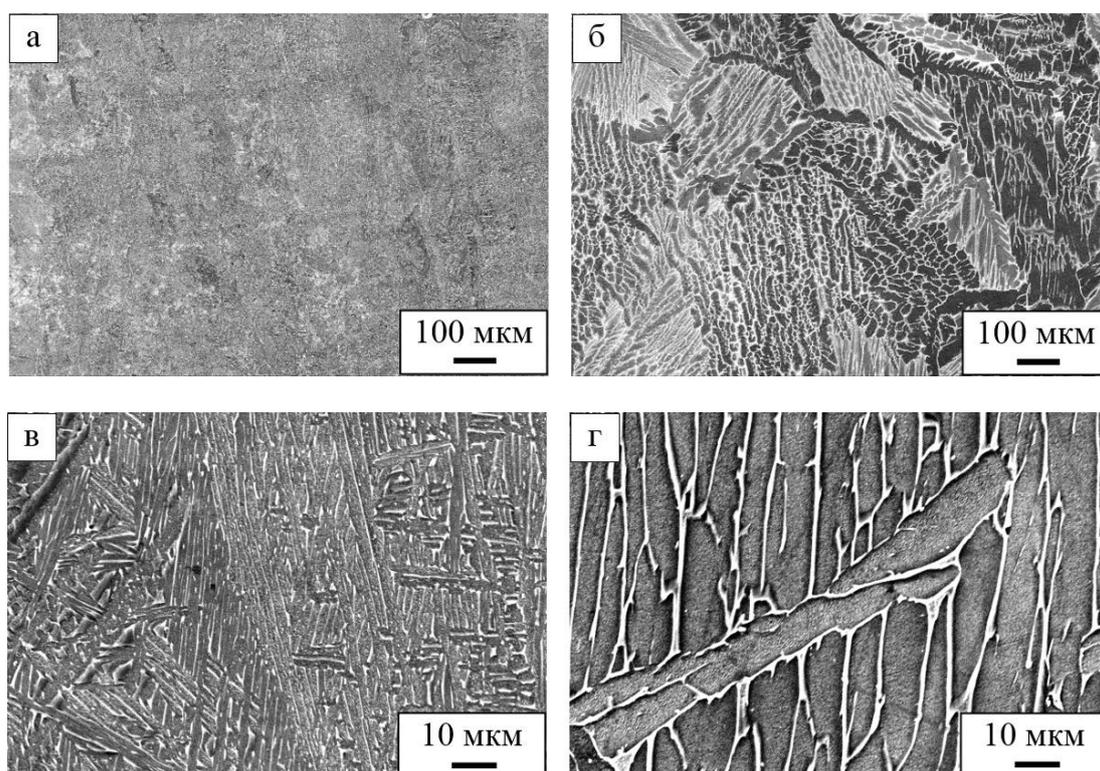


Рис. 3. РЭМ-изображения микроструктуры сплава Ti6Al4V:
а, в – после СЭЛП; б, г – после СЭЛП и ГИП

На рис. 3б, г представлена микроструктура сплава Ti6Al4V после горячего изостатического прессования. Произошла полная перекристаллизация сплава, и вместо столбчатых зерен сформировалась близкая к равноосной структура с размером зерна в центральной части темплета $0,6 \pm 0,2$ мм. При сравнении образцов, полученных по технологии СЭЛП, после ГИП микроструктура сплава стала грубее, размер пластинок α - и β -фазы увеличился примерно в два раза. Горячее изостатическое прессование не привело к заметному повышению микротвердости и плотности сплава (табл. 3).

На рис. 4 представлены изображения поверхностей трения изучаемых образцов. По классификации Б.И. Костецкого [20] при проведении испытаний проходит процесс нормального окислительного изнашивания. На поверхности трения при взаимодействии контактирующих материалов с воздушной средой образуются защитные пленки вторичных структур II типа.

Таблица 3. Значения микротвердости и плотности сплава Ti6Al4V

Микротвердость HV , МПа		
Усилие, Н	СЭЛП	СЭЛП + ГИП
1,47	3 835 ± 35	3 830 ± 130
0,98	3 900 ± 95	4 020 ± 70
0,49	4 035 ± 200	4 144 ± 180
Плотность, г/см ³		
–	4,491 ± 0,025	4,494 ± 0,016

На рис. 5 даны изображения продуктов износа, в табл. 4 представлены результаты энергодисперсионного микрохиманализа продуктов износа. Титан является химически активным металлом и взаимодействует с газами, входящими в состав воздуха [3]. Скорость поглощения титаном азота значительно меньше скорости поглощения кислорода. Продукты износа содержат практически одинаковое количество азота. При сравнении образцов, полученных по технологии СЭЛП, после ГИП продукты износа содержат на ~ 50 % больше кислорода.

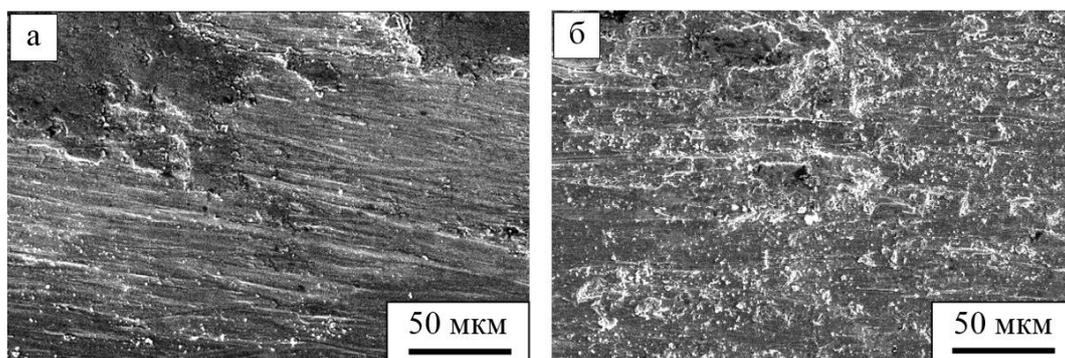


Рис. 4. РЭМ-изображения поверхностей трения образцов, полученных:
а – по технологии СЭЛП; б – по технологии СЭЛП и ГИП

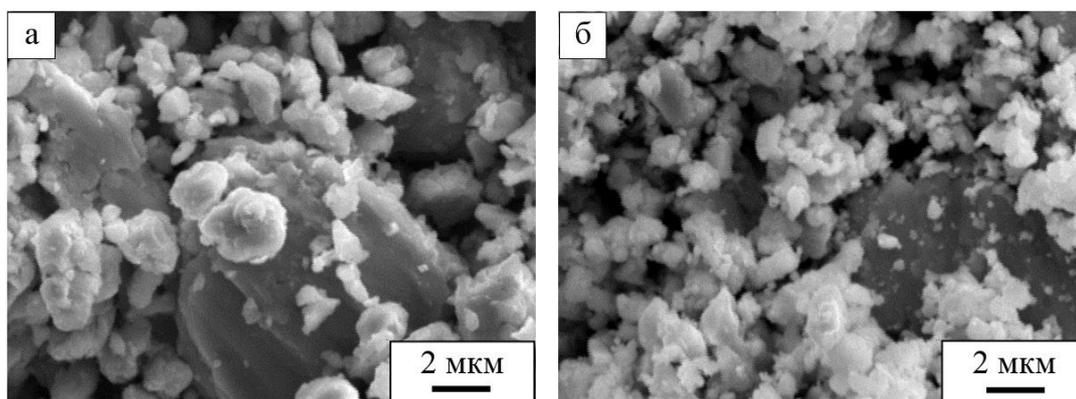


Рис. 5. РЭМ-изображение продуктов износа образцов сплава Ti6Al4V:
а – после СЭЛП; б – после СЭЛП и ГИП

Результаты испытаний на абразивное изнашивание (табл. 5) показали, что образец состава Ti6Al4V, полученный по технологии СЭЛП без ГИП, обладает на 25...70 % более низкими значениями характеристик изнашивания. Поскольку микро-

твердость изучаемых образцов практически одинакова, повышение абразивной износостойкости связано с ролью структурного фактора. Сплав состава Ti6Al4V, полученный по технологии СЭЛП, обладает уникальной тонкодисперсной микроструктурой, сформировавшейся при высокоскоростной кристаллизации расплава во время послойного синтеза.

Таблица 4. Химический состав (масс. %) продуктов износа

Способ обработки	N	O	Al	Ti	V
СЭЛП	3,91	19,46	3,56	68,74	4,33
СЭЛП + ГИП	3,81	28,70	3,78	59,43	4,28

Таблица 5. Характеристики изнашивания сплава Ti6Al4V

Способ обработки	$I_h, 10^{-9}$	$I_v, 10^{-15} \text{ м}^2$	$I, 10^{-8} \text{ мм/цикл}$	$u, 10^{-3} \text{ мм}^3/\text{ч}$
СЭЛП	40,8	39	44	25,5
СЭЛП + ГИП	50,9	55	55	44

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Металлографический анализ образцов сплава Ti6Al4V, полученного по технологии СЭЛП, показал полное межслоевое сплавление порошка. Исходная β -фаза при первичной кристаллизации имеет столбчатую морфологию, во время послойного синтеза происходит рост β -титана на зернах предыдущего слоя. Сплав имеет видманштеттову структуру, состоящую из α' -мартенсита с шириной пластин $1,6 \pm 0,4$ мкм и тонких прослоек β -фазы толщиной $0,14 \pm 0,05$ мкм.

При ГИП, выполненном на стандартном режиме, происходит полная перекристаллизация сплава и вместо столбчатых зерен формируется близкая к равноосной структура с размером зерна в центральной части темплета $0,6 \pm 0,2$ мкм. Применение технологии ГИП обеспечивает увеличение размера пластинок α - и β -фазы приблизительно в два раза. Плотность и микротвердость сплава практически не изменяются. Сплав Ti6Al4V, полученный по технологии СЭЛП, обладает на 25...70 % более низкими значениями характеристик изнашивания благодаря уникальной тонкодисперсной микроструктуре, сформировавшейся при высокоскоростной кристаллизации расплава во время послойного синтеза.

БЛАГОДАРНОСТИ

Металлографические исследования выполнены с использованием оборудования регионального центра коллективного пользования на базе Тверского государственного университета.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ильин А.А., Колачев Б.А., Полькин И.С. Титановые сплавы. Состав, структура, свойства: справочник. М.: ВИЛС-МАТИ. 2009. 520 с.
2. Борисова Е.А., Бочвар Г.А., Брун М.Я. [и др.] Металлография титановых сплавов / редкол.: С.Г. Глазунов, Б.А. Колачев. М.: Металлургия. 1980. 464 с.
3. Колачев Б.А., Елагин В.И., Ливанов В.А. Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов: учебник для вузов. М.: МИСИС. 2001. 416 с.

4. Соколов Ю.А., Афанасьева Л.Е., Новоселова М.В., Гречишкин Р.М. Триботехнические свойства сплава титана, полученного по технологии синтеза изделий электронным лучом // *Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел, деталей технологического и энергетического оборудования*. 2014. № 7. С. 118–123.
5. Афанасьева Л.Е. Закономерности формирования структуры сплава Ti-6Al-4V при послойном электронно-лучевом плавлении и горячем изостатическом прессовании // *Вопросы материаловедения*. 2017. № 3 (91). С. 27–34.
6. Соколов Ю.А., Афанасьева Л.Е., Барабонова И.А., Новоселова М.В., Гречишкин Р.М. Микроструктура и свойства сплава Ti-6Al-4V, полученного по технологии послойного электронно-лучевого синтеза // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2015. № 6 (720). С. 45–50.
7. He Weiwei, Jia Wenpeng, Liu Haiyan, Tang Huiping, Kang Xinting, Huang Yu. Research on preheating of titanium alloy powder in electron beam melting technology // *Rare Metal Materials and Engineering*. 2011. V. 40(12), pp. 2072–2075.
8. Li Xiang, Wang Chengtao, Wang Lin, Zhang Wenguang, Li Yuanchao. Fabrication of bioactive titanium with controlled porous structure and cell culture in vitro // *Rare Metal Materials and Engineering*. 2010. 39 (10), pp. 1697–1701.
9. Murr L.E., Amato K.N., Li S.J. et. al. Microstructure and mechanical properties of open-cellular biomaterials prototypes for total knee replacement implants fabricated by electron beam melting // *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*. 2011. V. 4, pp. 1396–1411.
10. Karlsson J., Snis A., Engqvist H., Lausmaa J. Characterization and comparison of materials produced by Electron Beam Melting (EBM) of two different Ti-6Al-4V powder fractions // *Journal of Materials Processing Technology*. 2013. V. 213, pp. 2109–2118.
11. Cheng X.Y., Li S.J., Murr L.E. et. al. Compression deformation behavior of Ti-6Al-4V alloy with cellular structures fabricated by electron beam melting // *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*. 2012. V. 16, pp. 153–162.
12. Koike M., Martinez K., Guo L. et. al. Evaluation of titanium alloy fabricated using electron beam melting system for dental applications // *Journal of Materials Processing Technology*. 2011. V. 211, pp. 1400–1408.
13. Hrabec N., Quinn T. Effects of processing on microstructure and mechanical properties of a titanium alloy (Ti-6Al-4V) fabricated using electron beam melting (EBM), part 1: Distance from build plate and part size // *Materials Science & Engineering A*. 2013. 573, pp. 264–270.
14. Gaytan S.M., Murr L.E., Medina F., Martinez E., Lopez M.I., and Wicker R.B. Advanced metal powder based manufacturing of complex components by electron beam melting // *Materials Technology*. 2009. V. 24, pp. 181–190.
15. Ahmed T., Rack H.J. Phase transformations during cooling in $\alpha+\beta$ titanium alloys // *Materials Science and Engineering A*. 1998. V. 243, pp. 206–211.
16. Safdar A., Wei L.-Y., Snis A., Lai Z. Evaluation of microstructural development in electron beam melted Ti-6Al-4V // *Materials characterization*. 2012. V. 65, pp. 8–15.
17. Al-Bermani S.S., Blackmore M.L., Zhang W, Todd I. The origin of microstructural diversity, texture, and mechanical properties in electron beam melted Ti-6Al-4V // *Metallurgical and materials transactions A*. 2010. V. 41. № 13, pp. 3422–3434.
18. Nemat-Nasser S., Guo W.G., Nesterenko V.F., Indrakanti S.S., Gu Y.B. Dynamic response of conventional and hot isostatically pressed Ti-6Al-4V alloys: experiments and modeling // *Mechanics of Materials*. 2001. V. 33. № 8, pp. 425–439.

19. Xu L., Guo R., Bai C., Lei J., Yang R. Effect of hot isostatic pressing conditions and cooling rate on microstructure and properties of Ti-6Al-4V alloy from atomized powder // *Journal of Materials Science & Technology*. 2014. V. 30. № 12, pp. 1289–1295.

20. Виноградов В.Н., Сорокин Г.М., Колокольников М.Г. Абразивное изнашивание. М.: Машиностроение. 1990. 224 с.

ABRASIVE WEAR RESISTANCE OF Ti6Al4V ALLOY PREPARED BY SELECTIVE ELECTRON BEAM MELTING

L.E. AFANASIEVA¹, Cand Sci, M.V. NOVOSELOVA¹, Cand Sci
A.I. IVANOVA², Cand Sci, R.M. GRECHISHKIN², Dr Sci

¹ Tver State Technical University, 22, Af. Nikitin emb., 170026, Tver, Russian Federation, e-mail: ludmila.a@mail.ru

² Tver State University, 33, Zhelyabova st. 170100, Tver, Russian Federation, e-mail: Rostislav.Grechishkin@tversu.ru

The results of experimental studies of tribotechnical properties of Ti6Al4V alloy, obtained by selective electron beam melting (SEBM) technology are presented. Microstructure studies were carried out by optical and scanning electron microscopy. It is shown that the synthesized alloy is in a quenched state with a nonequilibrium fine-dispersed $\alpha' + \beta$ structure, with a plate width α' – phase $1,6 \pm 0,4 \mu\text{m}$, β – phase – $0,14 \pm 0,05 \mu\text{m}$ and practically does not contain pores. After hot isostatic pressing, alloy gets a complete recrystallization, the size of the plates α and β phases increased by about 2 times. Hot isostatic pressing does not lead to an increase in density and microhardness, reduces abrasive wear resistance of the alloy due to the coarsening of the microstructure. Ti6Al4V alloy, obtained by SEBM technology, due to the structural factor, has increased abrasive wear resistance.

Keywords: titanium alloy, selective electron beam melting, abrasive wear resistance, hot isostatic pressing.

ACKNOWLEDGMENTS

These studies were performed using the equipment of the Regional Center of Tver State University.

REFERENCES

1. Ilyin A.A., Kolachov B.A., Polkin I.S., Titanovye splavy. Sostav, struktura, svoystva [Titanium alloys. Composition, structure, properties: Directory], Moscow: VILS-MATI, 2009.

2. Borisova E.A., Bochvar G.A., Brun M.Ya. et al. Metallografiya titanovykh splavov [Metallography of titanium alloys], Glazunova, S.G., Kolacheva, B.A. (Eds.), Moscow: Metallurgiya, 1980.

3. Kolachev B.A., Yelagin V.I., Livanov V.A. Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka tsvetnykh metallov i splavov. Uchebnik dlya vuzov. [Metal science and heat treatment of non-ferrous metals and alloys. Textbook for universities]. M.: MISIS, 2001. 416 p.

4. Sokolov Yu.A., Afanasieva L.E., Novoselova M.V., Grechishkin R.M. Tribological characteristics of titanium alloy obtained according to the technology of synthesis of products, electron beam. *Mechanics and physics of processes at the surface and in the contact of solids, parts manufacturing and energy equipment*. 2014. No 7, pp. 118–123. (In Russian).

5. Afanasieva L.E. Patterns of structure formation of Ti-6Al-4V fabricated by selective electron beam melting and hot isostatic pressing, *Voprosy materialovedeniya*. 2017. No 3 (91), pp. 27–34. (In Russian).
6. Sokolov Yu.A., Afanasieva L.E., Barabonova I.A., Novoselova M.V., Grechishkin R.M. Alloy Ti-6Al-4V Microstructure and Properties Prepared by Layer-by-Layer Electron-Beam Synthesis. *Metal Science and Heat Treatment*, 2015, V. 57, No 5–6, pp. 354–358.
7. He Weiwei, Jia Wenpeng, Liu Haiyan, Tang Huiping, Kang Xinting, Huang Yu. Research on preheating of titanium alloy powder in electron beam melting technology. *Rare Metal Materials and Engineering*. 2011. V. 40(12), pp. 2072–2075.
8. Li Xiang, Wang Chengtao, Wang Lin, Zhang Wenguang, Li Yuanchao. Fabrication of bioactive titanium with controlled porous structure and cell culture in vitro. *Rare Metal Materials and Engineering*. 2010. 39 (10), pp. 1697–1701.
9. Murr L.E., Amato K.N., Li S.J. et. al. Microstructure and mechanical properties of open-cellular biomaterials prototypes for total knee replacement implants fabricated by electron beam melting. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*. 2011. V. 4, pp. 1396–1411.
10. Karlsson J., Snis A., Engqvist H., Lausmaa J. Characterization and comparison of materials produced by Electron Beam Melting (EBM) of two different Ti-6Al-4V powder fractions. *Journal of Materials Processing Technology*. 2013. V. 213, pp. 2109–2118.
11. Cheng X.Y., Li S.J., Murr L.E. et. al. Compression deformation behavior of Ti-6Al-4V alloy with cellular structures fabricated by electron beam melting. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*. 2012. V 16, pp. 153–162.
12. Koike M., Martinez K., Guo L. et. al. Evaluation of titanium alloy fabricated using electron beam melting system for dental applications, *Journal of Materials Processing Technology*. 2011. V. 211, pp. 1400–1408.
13. Hrabec N., Quinn T. Effects of processing on microstructure and mechanical properties of a titanium alloy (Ti-6Al-4V) fabricated using electron beam melting (EBM). Part 1: Distance from build plate and part size. *Materials Science & Engineering A*. 2013. 573, pp. 264–270.
14. Gaytan S.M., Murr L.E., Medina F., Martinez E., Lopez M.I., and Wicker R.B. Advanced metal powder based manufacturing of complex components by electron beam melting. *Materials Technology*, 2009. V. 24, pp. 181–190.
15. Ahmed T., Rack H.J. Phase transformations during cooling in $\alpha + \beta$ titanium alloys. *Materials Science and Engineering A*. 1998. V. 243, pp. 206–211.
16. Safdar A., Wei L.-Y., Snis A., Lai Z. Evaluation of microstructural development in electron beam melted Ti-6Al-4V. *Materials characterization*. 2012. V. 65, pp. 8–15.
17. Al-Bermani S.S., Blackmore M.L., Zhang W, Todd I. The origin of microstructural diversity, texture, and mechanical properties in electron beam melted Ti-6Al-4V. *Metallurgical and materials transactions A*. 2010. V. 41. No 13, pp. 3422–3434.
18. Nemat-Nasser S., Guo W.G., Nesterenko V.F., Indrakanti S.S., Gu Y.B. Dynamic response of conventional and hot isostatically pressed Ti-6Al-4V alloys: experiments and modeling. *Mechanics of Materials*. 2001. V. 33. No 8, pp. 425–439.
19. Xu L., Guo R., Bai C., Lei J., Yang R. Effect of hot isostatic pressing conditions and cooling rate on microstructure and properties of Ti-6Al-4V alloy from atomized powder. *Journal of Materials Science & Technology*. 2014. V. 30. No 12, pp. 1289–1295.
20. Vinogradov V.N., Sorokin G.M., Kolokol'nikov M.G. *Abrazivnoye iznashivaniye* [Abrasive wear]. M.: Mashinostroyeniye. 1990. 224 p.

ТРАНСПОРТНОЕ, ГОРНОЕ И СТРОИТЕЛЬНОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 622.331:621.744.4

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГОЕМКОСТИ ПРОЦЕССА ФОРМОВАНИЯ КУСКОВОГО ТОРФА

А.Л. ЯБЛОНЕВ, д-р техн. наук, А.М. ГУСЕВА

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

Добыча кускового торфа предполагает использование машин, рабочим органом которых является шнековый пресс. Конструкции таких машин хотя и отличаются детально, однако имеют ряд схожих параметров, в том числе самую высокую энергоемкость во всем технологическом цикле производства. Данное исследование посвящено изучению режимов формования кускового торфа с целью снижения энергоемкости процесса без потери куском показателей плотности, а соответственно – прочности. Для этого авторами в лабораторных условиях произведено опытное диспергирование и формование торфа шнековым прессом, имеющим 5 скоростных режимов, 3 сменных мундштука и 2 шнека с различным шагом витков. В ходе исследования определялись влага исходного сырья, полезная мощность, производительность пресса, удельная энергия процесса. Результаты исследования показали, что существуют наиболее рациональные режимы работы шнекового пресса, состоящие из сочетания скорости вращения шнека, диаметра мундштука и шага витков шнека.

Ключевые слова: кусковой торф, формование, энергоемкость, шнековый пресс, диспергирование, мундштук, коэффициент напора.

ВВЕДЕНИЕ

Производство торфа фрезформовочным методом призвано ликвидировать дефицит коммунально-бытового топлива в районах, где нет газа, на основе использования местных источников сырья. Запасы торфа в России огромны. По самым скромным подсчетам и оценкам, они составляют около 35 % мировых. Уже сегодня в отдельных регионах торф составляет значительную часть местного энергобаланса, а его сжигание, проводимое в современных котельных установках с использованием принципа «кипящий слой», является высокорентабельным и конкурентоспособным по сравнению с привозным углем, мазутом и даже со сверхлимитным газом [1]. Это легкое (плотность в навале до 500 кг/м³) и безопасное для его перевозки любым видом транспорта топливо имеет теплотворную способность 3 200 ккал/кг при содержании влаги 33 % [2]. Схожая ситуация с использованием местных возобновляемых источников энергии из-за постоянного удорожания газа и в других странах мира [3, 4].

Фрезформовочный метод добычи кускового торфа основан на применении навесной, прицепной или полунавесной на колесный трактор машины, осуществляющей щелевое фрезерование торфяной залежи на глубину до 550 мм, формование торфа шнековым прессом, выстилку куска на картовое поле через многопоточный мундштук в виде цилиндров или волнистого расстила для последующей естественной сушки. Щелевое фрезерование и формование – самые энергоемкие операции (порядка

50 % эксплуатационных расходов и около 25 % от общей себестоимости продукта) во всем технологическом цикле производства торфа фрезформовочным методом. Производительность таких машин (рис. 1) составляет до 40 м³/ч [5].



Рис. 1. Добыча торфа фрезформовочным методом

В связи с изложенным, а также учитывая, что в настоящее время в России ведутся работы над проектированием различных модификаций фрезформовочных машин, представляется актуальным данное исследование, целью которого является изыскание путей снижения энергоемкости диспергирования и формования торфа без потери куском прочностных характеристик.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В шнековых прессах одновременно сочетаются несколько функций: транспортирование материала, его резание-перетиравание-раздавливание, сжатие, гомогенизация и формование. Поэтому по длине напорной трубы пресса условно можно выделить зоны [6], в которых реализуются все перечисленные функции. Причем торф, как и любой другой материал, попавший в загрузочную воронку шнекового пресса, постепенно продвигаясь по напорной трубе к мундштуку, тщательно перемешивается и перерабатывается, приобретая все большую однородность по дисперсности и влаге [7]. В результате таких механических воздействий переработанный торф принимает свойства – аморфность, пластичность, а после формования и сушки – прочность и высокую плотность. Производительность, необходимая мощность, удельный расход энергии и качество готового торфа зависят при прочих равных условиях от степени переработки торфомассы [8].

В качестве критериев формуемости торфяного сырья можно выделить: возможность достаточно легкого развития в торфе пластических деформаций; сохранение куском приданной в мундштуке формы; достижение куском плотности, позволяющей проведение последующих операций; недопустимость наличия у торфяного куска после формования и сушки макродефектов (трещин), снижающих его механическую прочность и ухудшающих товарный вид готового топлива [9].

Из природных факторов на прочность кускового торфа влияют степень разложения, содержание гумуса и пр.; из технологических – степень переработки, достигнутая плотность, размер куска и др. Катионный и групповой состав различных видов торфа является следствием торфообразовательных процессов, которые, наряду со степенью разложения и дисперсностью, определяют структурообразование куска [10]. Верховой торф средней и высокой степени разложения более пластичен, чем насыщенный катионами низинный. При десорбции влаги в его объеме отсутствуют

условия, вызывающие локальные перенапряжения. В низинном же торфе происходит структурообразование на основе взаимодействия через поливалентные катионы, в центральных зонах куска развивается повышенное давление, что способствует образованию микротрещин [10]. Наилучшим с точки зрения формуемости является верховой торф, а многочисленные исследования показали, что он должен иметь начальное содержание влаги $w = 82...84\%$ и степень разложения $R = 25...35\%$. Но недостаточно изученными остаются вопросы о режимах формования – скорости вращения шнека, шаге витков шнека, соотношении площадей живого сечения напорной трубы и мундштука.

С целью разрешения вышепоставленных вопросов был проведен лабораторный эксперимент по формованию комплексного верхового торфа степенью разложения $R = 25...30\%$ при среднем содержании влаги $w = 83,44\%$. Содержание влаги определялось по стандартной методике путем высушивания навески торфа с помощью анализатора влажности ЭЛВИЗ 2С. Поскольку в фрезформовочной машине во время экскавации из залежи перед попаданием в шнековый пресс торф измельчается, опытные образцы торфяного сырья были предварительно измельчены дополнительным диспергированием с отсевом древесных включений. Формование проводилось на лабораторной установке (рис. 2), схема которой представлена на рис. 3.



Рис. 2. Лабораторный шнековый пресс

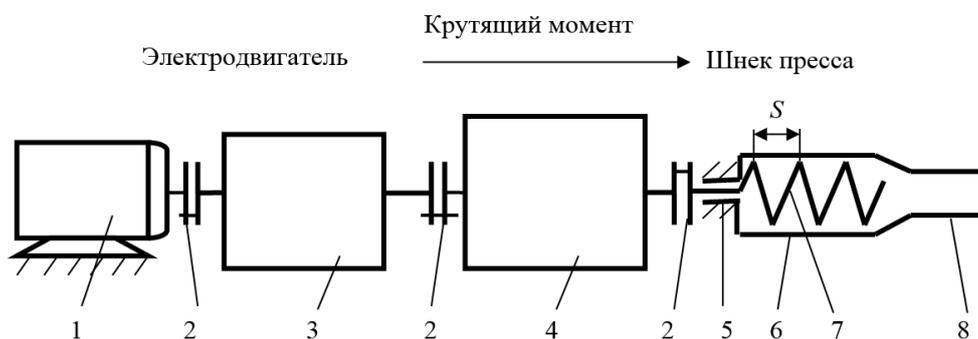


Рис. 3. Схема лабораторного шнекового пресса: 1 – электродвигатель; 2 – муфта соединительная; 3 – коробка передач; 4 – редуктор цилиндрический; 5 – опорные подшипники шнека; 6 – труба напорная (корпус цилиндрический); 7 – шнек; 8 – мундштук цилиндрический

Асинхронный электродвигатель переменного тока мощностью 10 кВт с частотой вращения ротора 1 480 об/мин, пятискоростная коробка передач и цилиндрический редуктор с передаточным отношением $i_{ред} = 4,25$ позволяли изменять частоту вращения шнека пресса от 55,81 до 429,86 об/мин. Пресс комплектовался тремя мундштуками внутренним диаметром 52, 60 и 92 мм и двумя шнеками с шагом витков $S = 50$ и 110 мм (рис. 4).



Рис. 4. Сменные мундштуки и шнеки для пресса

В процессе экспериментов проводилось исследование работы шнекового пресса в холостом и нагруженном состоянии на 5 режимах, соответствующих 5 различным скоростям в коробке передач. Вычисление мощности, необходимой для привода пресса на холостом ходу и под нагрузкой (соответственно N_{xx} и N , Вт), производилось по зависимостям:

$$N_{xx} = 3UI_{xx} \cos\varphi, \quad (1)$$

$$N = 3UI \cos\varphi, \quad (2)$$

где U – напряжение в одной из фаз электродвигателя, В; I – сила тока в одной из фаз электродвигателя, А; $\cos\varphi$ – коэффициент мощности асинхронного двигателя, равный отношению активной мощности N , кВт, необходимой для совершения им полезной работы и преодоления механических потерь, к полной мощности, потребляемой электродвигателем из сети $N_э$, кВт·А (для установленного на шнековом прессе двигателя $\cos\varphi = 0,88$).

Полезная мощность N_p , Вт, определялась как разница полной мощности и мощности холостого хода:

$$N_p = N - N_{xx}. \quad (3)$$

Скорость выхода формованного торфа из мундштука v , м/с, оценивалась по прикрепленному к мундштуку шаблону длиной $L = 0,15$ м и секундомеру (рис. 5). Производительность пресса Q , м³/с, рассчитывалась по формуле

$$Q = v \frac{\pi d^2}{4}, \quad (4)$$

где d – диаметр установленного мундштука, м.

Энергоемкость процесса диспергирования и формования A , Дж/м³, определялась по зависимости

$$A = \frac{N_{\text{п}}}{Q}. \quad (5)$$



Рис. 5. Процесс формования торфа

После формования на различных режимах куски торфа были разложены в специальные кюветы и подвергнуты сушке в мягком режиме на протяжении 25 суток до достижения среднего равновесного содержания влаги $w = 23,12\%$. По окончании сушки объемным методом с использованием цифрового штангенциркуля ШЦЦ 1-150-0,01 с точностью 0,01 мм и весов «Асом JW-1» с точностью 0,01 г была произведена оценка плотности кусков, полученных на различных режимах. Все опыты проведены с шестикратной повторяемостью.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

После проведенных расчетов и их анализа с отсевом промахов были получены графические зависимости энергоемкости от частоты вращения шнека при различных установленных мундштуках диаметром d и шнеках с шагом витком S (рис. 6, 7). Среди прочих способов управления энергоемкостью в производственном процессе проще изменять количество и размеры мундштуков. Учитывая факт, что напор создается шнеком еще в напорной части трубы и продолжается в мундштуке, испытывая противодействие, для описания степени уплотнения торфа в иных условиях и использования метода геометрического подобия, предлагается ввести понятие «коэффициент напора» $k_{\text{н}}$, который представляет собой отношение площадей живых сечений напорной трубы и мундштука:

$$k_{\text{н}} = \frac{D^2 - d_{\text{вн}}^2}{d^2}, \quad (6)$$

где D – внутренний диаметр напорной трубы; $d_{\text{вн}}$ – наружный диаметр трубы, являющейся основой для спирали шнека; d – диаметр мундштука.

В исследовании применялся шнековый пресс с параметрами $D = 102$ мм, $d_{\text{вн}} = 49$ мм. В этом случае коэффициенты напора $k_{\text{н}}$ составили для мундштуков диаметром 52, 60 и 92 мм 2,96, 2,22 и 0,95 соответственно. Для всех представленных зависимостей получены уравнения регрессии с коэффициентами детерминации R^2 .

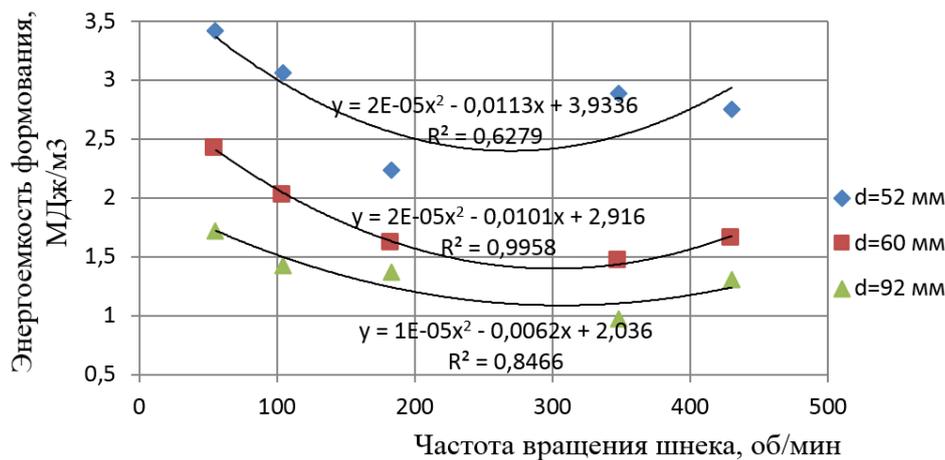


Рис. 6. Зависимость энергоёмкости формования от частоты вращения шнека с шагом витков $S = 110$ мм

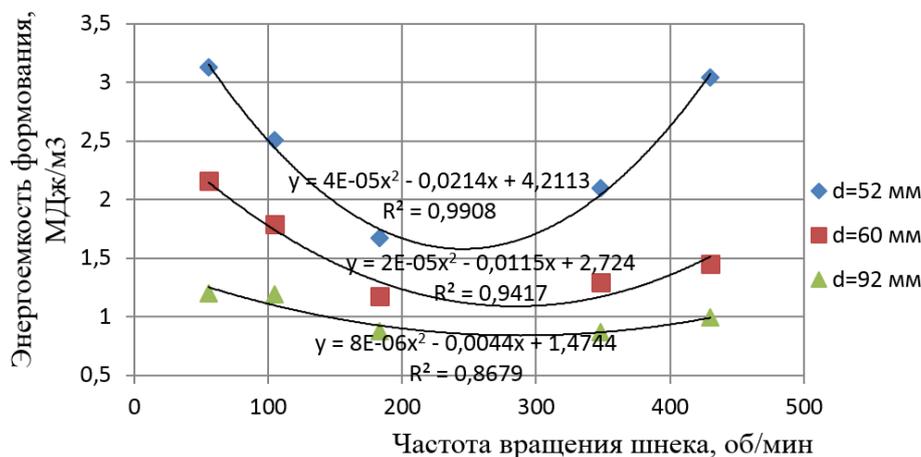


Рис. 7. Зависимость энергоёмкости формования от частоты вращения шнека с шагом витков $S = 50$ мм

Как видно из рис. 6 и 7, энергоёмкость формования напрямую зависит от частоты вращения и шага витков шнека, соотношения площадей живого сечения напорной трубы и мундштука. В проведенном исследовании энергоёмкость изменялась от 0,88 до 3,42 МДж/м³, причем минимальное ее значение во всех экспериментах приходилось на диапазон скорости вращения шнека 220...320 об/мин.

Для оценки сходства или различия статистических показателей зависимостей, представленных на рис. 6 и 7 и подверженных влиянию случайных факторов, которые обусловлены различными значениями шага витков шнека, применялся метод проверки статистических гипотез [11, 12]. На начальном этапе была выдвинута нулевая гипотеза, состоящая в предположении, что генеральные средние исследованных зависимостей совпадают. При этом энергоёмкость определяется общим для двух случаев набором факторов. Критериями сравнения служила статистика $|\tilde{v}|$ с учетом объемов выборок n_{110} и n_{50} , параметра s и числа степеней свободы f_{110} и f_{50} :

$$|\tilde{v}| = \frac{|\bar{A}_{110} - \bar{A}_{50}|}{\sqrt{\frac{1}{n_{110}}D_{110} + \frac{1}{n_{50}}D_{50}}}, \quad (7)$$

$$c = \frac{\frac{1}{n_{110}} D_{110}}{\frac{1}{n_{110}} D_{110} + \frac{1}{n_{50}} D_{50}}, \quad (8)$$

$$f_{110} = n_{110} - 1, \quad (9)$$

$$f_{50} = n_{50} - 1, \quad (10)$$

где \bar{A}_{110} и \bar{A}_{50} – средние значения энергоёмкости по двум выборкам; D_{110} и D_{50} – несмещенные оценки дисперсий по двум выборкам:

$$D_{110} = \frac{\sum(A_{i110} - \bar{A}_{110})^2}{f_{110}}, \quad (11)$$

$$D_{50} = \frac{\sum(A_{j50} - \bar{A}_{50})^2}{f_{50}}, \quad (12)$$

где A_{i110} и A_{j50} – точечные значения энергоёмкости при формировании шнеками с шагом витков, соответственно, 110 и 50 мм.

Сравнивались две выборки значений энергоёмкости, полученные при формировании с мундштуком внутренним диаметром 60 мм шнеком с шагом витков 110 и 50 мм. В этом случае $n_{110} = n_{50} = 5$; $f_{110} = f_{50} = 4$. Расчет статистических характеристик выборок сведен в таблицу.

Расчет статистических характеристик энергоёмкости формирования кускового торфа шнеками с шагом витков 110 и 50 мм

$A_{i110}, \text{МДж/м}^3$	$A_{i110} - \bar{A}_{110}$	$(A_{i110} - \bar{A}_{110})^2$
2,426 71	0,586 904	0,344 456
2,023 81	0,184 004	0,033 857
1,618 18	-0,221 626	0,049 118
1,470 85	-0,368 956	0,136 129
1,659 48	-0,180 326	0,032 517
$\sum A_{110} = 9,199 03; \bar{A}_{110} = 1,839 806$		$\sum(A_{i110} - \bar{A}_{110})^2 = 0,596 077$
$D_{110} = 0,149 019$		
$A_{j50}, \text{МДж/м}^3$	$A_{j50} - \bar{A}_{50}$	$(A_{j50} - \bar{A}_{50})^2$
2,157 52	0,582 396	0,339 185
1,790 09	0,214 966	0,046 210
1,178 64	-0,396 484	0,157 200
1,299 05	-0,276 074	0,076 217
1,450 32	-0,124 804	0,015 576
$\sum A_{50} = 7,875 62; \bar{A}_{50} = 1,575 124$		$\sum(A_{j50} - \bar{A}_{50})^2 = 0,634 388$
$D_{50} = 0,158 597$		

Статистика и параметр c , определенные по зависимостям (7) и (8), составили:

$$|\tilde{v}| = \frac{|1,839\ 806 - 1,575\ 124|}{\sqrt{\frac{0,149\ 019}{5} + \frac{0,158\ 597}{5}}} = 1,067\ 1,$$

$$c = \frac{\frac{0,149\ 019}{5}}{\frac{0,149\ 019}{5} + \frac{0,158\ 597}{5}} = 0,484\ 43.$$

Состоятельность нулевой гипотезы на уровне значимости $\alpha = 0,05$ проверяется сравнением рассчитанного значения статистики $|\tilde{v}|$ с ее табличным значением $|v|(c; f_{110}; f_{50}; \alpha)$. Если табличное значение статистики превышает рассчитанное по формуле (7), то нулевая гипотеза принимается. В рассматриваемом случае $|v|(c; f_{110}; f_{50}; \alpha) = |v|(0,484\ 43; 4; 4; 0,95) \approx 2,33$ [11]. Поскольку табличное значение статистики выше рассчитанного, нулевая гипотеза принимается. Можно считать, что на энергоемкость формования кускового торфа различными шнеками с шагом витков 110 и 50 мм влияют одни и те же факторы, а сравниваемые средние являются оценками одной и той же генеральной средней.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проектирование и использование фрезформовочных машин в рациональных режимах позволит уменьшить потери торфа при производстве и снизить удельные энергозатраты без потери куском плотности, а соответственно – и прочности.

По результатам работы можно сделать следующие выводы.

1. Для всех исследованных режимов существует некий минимум энергоемкости при формовании, приходящийся на область 220...320 об/мин шнека, который можно объяснить следующим. Энергоемкость – это не затраченная энергия, а отношение полезной мощности к производительности, т.е. удельная характеристика. Интенсивность роста производительности выше, чем интенсивность роста мощности, необходимой для производства куска, до определенной частоты вращения шнека. Выше этой частоты начинается неустановившееся движение материала (частицы материала прекращают двигаться только в осевом направлении и все больше начинают вращаться вместе со шнеком). Это приводит к изменению интенсивностей роста производительности и необходимой мощности, в результате чего повышается энергоемкость процесса, что ведет к повышению износа рабочих частей пресса [13].

2. Интенсивность изменения удельных энергозатрат выше при установке мундштука меньшего диаметра. По мере увеличения диаметра мундштука интенсивность изменения удельных энергозатрат падает.

3. Большая производительность, и, соответственно, меньшее время формования, всегда соответствует большему шагу витков шнека. Большая сила тока в приводном двигателе (и необходимая мощность на формование) соответствует установленному мундштуку меньшего диаметра. Большая энергоемкость в исследованной зоне при прочих равных условиях соответствует использованию шнека с большим шагом, что объясняется большей нагрузкой на виток и большей производительностью механизма.

4. Наиболее рациональным режимом представляется частота вращения шнека $n = 220...320$ об/мин при коэффициенте напора $k_n = 2,22$ и шаге витков шнека $S = 0,5D$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Горячев В.И., Михеев И.И., Яблонев А.Л., Фомин К.В. Выбор прессы для обезвоживания торфа в технологии фракционирования торфяного сырья гидро-размывом // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2018. № S38. С. 22–30. DOI: 10.25018/0236-1493-2018-7-38-22-30.
2. Яблонев А.Л., Гусева А.М., Жуков Н.М. Добыча и использование кускового торфяного топлива для арктических условий // *Труды Инсторфа*. 2018. № 17 (70). С. 46–49.
3. Van Loon S., Bond J.D. Yukon Placer Mining Industry 2010 to 2014. Whitehorse: Yukon Geological Survey, 2014. 239 p.
4. Misnikov O.S. Basic Technologies and Equipment Used for Peat Deposits Development in Foreign Countries. E3S Web of Conferences «III-d International Innovative Mining Symposium». V. 41. 2018, P. 01046. DOI: 10.1051/e3sconf/20184101046.
5. Яблонев А.Л. Проектирование торфодобывающих предприятий. Тверь: ТвГТУ. 2016. 164 с.
6. Тимофеева Д.В., Попов В.П., Антимонов С.В., Зинюхина А.Г. Разработка конструкции шнека типового пресс-экструдера // *Вестник Оренбургского государственного университета*. 2014. № 9. С. 220–225.
7. Singh R.K., Das A. Analysis of Separation Response of Kelsey Centrifugal Jig in Processing Fine Coal // *Fuel Processing Technology*. 2013. V. 115, pp. 71–78.
8. Горячев В.И., Зюзин Б.Ф., Михеев И.И., Казичев И.Н. Технологический комплекс производства кускового топливного торфа с комбинированной сушкой // *Труды Инсторфа*. 2016. № 13 (66). С. 28–32.
9. Зюзин Б.Ф., Фомин Д.С. О влиянии физико-механических свойств исходного торфа на процесс механического диспергирования // *Труды Инсторфа*. 2013. № 7 (60). С. 49–52.
10. Михайлов А.В., Большунов А.В., Кремчеев Э.А., Елифанцев К.В. Требования к торфяному сырью для производства окускованного топлива // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2012. № 4. С. 59–63.
11. Богатов Б.А., Копенкин В.Д. Математические методы в торфяном производстве. М.: Недра. 1991. 240 с.
12. Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. Теория вероятностей и ее инженерные приложения. М.: Наука. 1988. 480 с.
13. Соколов М.В., Клинков А.С., Ефремов О.В., Беляев П.С., Однолько В.Г. Автоматизированное проектирование и расчет шнековых машин: монография. М.: Машиностроение-1. 2004. 248 с.

DETERMINATION OF POWER CONSUMPTION OF PROCESS OF FORMATION OF LUMPY PEAT

A.L. YABLONEV, Dr Sci, A.M. GUSEVA

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

Extraction of sod peat assumes using of cars which working body is the screw press. Though designs of such cars differ in details, however have a number of similar parameters, including – the highest power consumption in all production cycle of production. This

research is devoted to studying of the modes of formation of sod peat for the purpose of decrease in power consumption of process without loss by a piece of indicators of density, and, respectively – durability. For this purpose, authors in vitro made skilled dispersion and formation of peat by the screw press having 5 high-speed modes, 3 replaceable nozzles and 2 screws with various step of rounds. During the research was defined moisture of initial raw materials, useful power, press productivity, specific energy of process. Results of a research show that there are most rational operating modes of a screw press consisting of a combination of speed of rotation of the screw, diameter of a nozzle and a step of rounds of the screw.

Keywords: sod peat, formation, power consumption, screw press, dispersion, nozzle, pressure coefficient.

REFERENCES

1. Goryachev V.I., Mikheev I.I., Yablonev A.L., Fomin K.V. Select Press to Dewater the Peat in Fractionation Technologies Peat Raw Materials by Hydroscour. *Gornyy Informatsionno-analiticheskiy Byulleten*. 2018, No S38, pp. 22–30. DOI: 10.25018/0236-1493-2018-7-38-22-30. (In Russian).
2. Yablonev A.L., Guseva A.M., Zhukov N.M. The Extraction and Use of Sod Peat Fuel for Arctic Conditions. *Trudi Instorfa*. 2018, No 17 (70), pp. 46–49. (In Russian).
3. Van Loon S., Bond J.D. Yukon Placer Mining Industry 2010 to 2014. Whitehorse: Yukon Geological Survey, 2014. 239 p.
4. Misnikov O.S. Basic Technologies and Equipment Used for Peat Deposits Development in Foreign Countries. *E3S Web of Conferences «III-d International Innovative Mining Symposium»*. V. 41. 2018, pp. 01046. DOI: 10.1051/e3sconf/20184101046
5. Yablonev A.L. *Proektirovanie torfodobyvayushchikh predpriyatii* [Design of Peat Extraction Enterprises]. Tver: TvGTU, 2016. 164 p. (In Russian).
6. Timofeeva D.V., Popov V.P., Antimonov S.V., Zinuhina A.G. Design of Screw Model Press Extruder. *Vestnik Orenburgskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2014, No 9, pp. 220–225. (In Russian).
7. Singh R.K., Das A. Analysis of Separation Response of Kelsey Centrifugal Jig in Processing Fine Coal. *Fuel Processing Technology*. 2013. V. 115, pp. 71–78.
8. Goryachev V.I., Zuzin B.F., Mikheev I.I., Kazitchev I.N. Technological Complex of Sod Peat Fuel Production with Combined Drying. *Trudy Instorfa*. 2016, No 13 (66), pp. 28–32. (In Russian).
9. Zuzin B.F., Fomin D.S. On the Impact of Physical and Mechanical Properties of the Original Peat on the Process of Mechanical Dispersion. *Trudi Instorfa*. 2013. No 7 (60), pp. 49–52. (In Russian).
10. Mikhailov A.V., Bolshunov A.V., Kremcheev E.A., Epifantcev K.V. Requirements for Peat Raw Materials for the Production of Pre-sod Fuel. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten* 2012. No 4, pp. 59–63. (In Russian).
11. Bogatov B.A., Kopenkin V.D. *Matematicheskiye metody v torfyanom proizvodstve* [Mathematical Methods in Peat Production]. Moscow: Nedra, 1991. 240 p.
12. Ventzel Ye.S., Ovcharov L.A. *Teoriya veroyatnostey i yeyo inzhenerniye prilogeniya* [Theory of Probability and its Engineering Applications]. Moscow: Nauka, 1988. 480 p.
13. Sokolov M.V., Klinkov A.S., Efremov O.V., Belyaev P.S., Odnolko V.G. *Avtomatizirovannoye proektirovaniye i raschet shnekovykh mashin* [Computer-aided Design and Calculation of Screw Machines]. Moscow: Mashinostroyeniye-1, 2004. 248 p.

ЛЕНТОЧНЫЙ ФИЛЬТР-ПРЕСС НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ С РАВНОМЕРНОЙ ПОДАЧЕЙ ОТЖИМАЕМОГО МАТЕРИАЛА В ПРЕССОВОЕ ПРОСТРАНСТВО

И.И. МИХЕЕВ, канд. техн. наук, В.И. ГОРЯЧЕВ, д-р техн. наук,
Д.М. ЩЕРБАКОВА

Тверской государственной технический университет, 170026, Тверь,
наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: mikheev1937@yandex.ru

Разработана конструкция ленточного фильтр-пресса непрерывного действия с равномерной подачей отжимаемого материала в прессовое пространство. В существующих ленточных фильтр-прессах отжимаемый материал активно подается в прессовое пространство из загрузочного окна только в контакте с движущимся верхним фильтровальным полотном, установленным на натяжном валу. По мере удаления от него увеличивается вероятность зависания материала в загрузочном окне с последующим его обрушением, в результате чего в прессовом пространстве отжимаемый материал движется с большей или меньшей плотностью по сравнению с фактической. При этом изменяется и толщина слоя отжимаемого материала. Отсутствует также возможность регулирования площади загрузочного окна фильтр-пресса, что не позволяет изменять объем подаваемого на отжим материала. Все это снижает производительность фильтр-пресса и качество продукта по требуемой влажности. Для устранения указанных недостатков в разработанной конструкции фильтр-пресса напротив натяжного вала установлен приводной вал-активатор, вращение которого совместно с движущимся верхним фильтровальным полотном обеспечивает равномерную подачу отжимаемого материала по всей площади загрузочного окна. Последнее выполнено с возможностью регулирования его площади. В результате повышается производительность фильтр-пресса и улучшается качество получаемого продукта по требуемой влажности.

Ключевые слова: ленточный фильтр-пресс, вал-активатор, отжимаемый материал, равномерная плотность, регулируемая частота вращения вала, загрузочное окно, повышение производительности.

ВВЕДЕНИЕ

Переработка в промышленных масштабах малоразложившегося торфа предусматривает двухэтапное его обезвоживание – механическое удаление влаги и последующую досушку. На первом этапе применяются, в том числе, различные ленточные фильтр-прессы непрерывного действия [1–3].

Для качественного отжима подаваемого в прессовое пространство материала необходимо в месте загрузки обеспечить его равномерную плотность. Однако в ленточных фильтр-прессах в зоне загрузочного окна отжимаемый материал активно подается в прессовое пространство только в контакте с верхним фильтровальным полотном, установленным на верхнем натяжном валу. По мере удаления от натяжного вала увеличивается вероятность зависания материала в загрузочном окне с последующим его обрушением, в результате чего в прессовом пространстве отжимаемый материал движется с меньшей или большей плотностью по сравнению с фактической, что не позволяет реализовывать оптимальные давления гидроцилиндров

на отжимаемый материал. Если плотность материала ниже фактической, то материал излишне сжимается, что ухудшает влагоотделение. Если же плотность материала выше фактической, то материал сжимается недостаточно, и это также ухудшает влагоотделение. Отсутствует и возможность регулирования площади загрузочного окна фильтр-пресса, что не позволяет регулировать объем подаваемого на отжим материала. Все это снижает производительность фильтр-пресса и качество продукта по требуемой влажности. Цель настоящей работы – разработать конструкцию ленточного фильтр-пресса непрерывного действия с равномерной подачей отжимаемого материала в прессовое пространство.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Выше было показано, что при неравномерной подаче отжимаемого материала изменяется его плотность, а следовательно, и толщина отжимаемого слоя. Известно, что теоретическое количество воды, прошедшее сквозь фильтр-пресс, определяется скоростью движения жидкости в отжимаемом слое [1]. Эта скорость в какой-либо момент времени может быть найдена из уравнения Дарси (1):

$$V_{\phi} = -\frac{K_{\phi} dP_n}{\rho_v dh}, \quad (1)$$

где V_{ϕ} – скорость фильтрации; K_{ϕ} – коэффициент фильтрации; P_n – поровое давление жидкости плотностью ρ_v в слое высотой h от места начала фильтрации; dP_n/dh – градиент гидравлического напора жидкости в направлении, обратном фильтрации.

Из уравнения видно, что одним из факторов, определяющих скорость фильтрации V_{ϕ} , является толщина фильтруемого слоя h . Следовательно, для оптимальной скорости фильтрации для конкретного отжимаемого материала необходимо соблюдение в процессе отжима оптимальной толщины отжимаемого слоя.

Следует также отметить основные конструкторско-технологические параметры ленточных фильтр-прессов непрерывного действия, определяемые с помощью системы уравнений [4, 5]:

уравнение прессового пространства, характеризующее изменение расстояния (высоты) между сближающимися друг с другом фильтрующими поверхностями, в общем случае имеет вид

$$H = H_{\min} + H(l); \quad (2)$$

уравнение состояния торфа (материала) как грунтовой массы

$$H = G \left(\frac{W}{\rho_v} + \frac{1}{\rho} \right); \quad (3)$$

уравнение одинакового режима

$$GV_{\phi} = const; \quad (4)$$

уравнение производительности

$$Q = BGV_{\phi}, \quad (5)$$

где H – высота (толщина) сжимаемого слоя материала при влагосодержании W ; $H(l)$ – закон изменения прессового пространства в функции от координаты l , отсчитываемой от минимальной высоты сжимаемого слоя материала H_{\min} ; G – удельная нагрузка прессового пространства по сухому веществу; ρ и ρ_v – плотность твердой фазы и воды, соответственно; V_{ϕ} и $V_{л}$ – скорость обезвоживания материала (фильтрации воды) и скорость движения фильтров (лент) соответственно; Q – теоретическая производительность пресса по сухому веществу; B – ширина прессового пространства (лент).

Видно, что одним из параметров фильтр-пресса является H – оптимальная высота (толщина) сжимаемого слоя материала.

Таким образом, одним из важнейших условий эффективной работы ленточного фильтр-пресса является необходимость равномерной подачи отжимаемого материала в прессовое пространство, что обеспечит оптимальную высоту сжимаемого слоя. Для выполнения этого условия необходима соответствующая конструкция загрузочной зоны ленточного фильтр-пресса непрерывного действия. При этом нужно обеспечить равномерность подачи отжимаемого материала по ширине загрузочного окна с помощью вала-активатора и синхронизировать окружную скорость вала-активатора с линейной скоростью фильтровальной ленты.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для решения поставленной задачи в разработанной конструкции фильтр-пресса (рис. 1) напротив натяжного вала установлен приводной вал-активатор, вращение которого совместно с движущимся верхним фильтровальным полотном обеспечивает равномерную подачу отжимаемого материала по всей площади загрузочного окна, причем последнее выполнено с возможностью регулирования его площади. В результате повышается производительность фильтр-пресса и улучшается качество получаемого продукта по требуемой влажности.

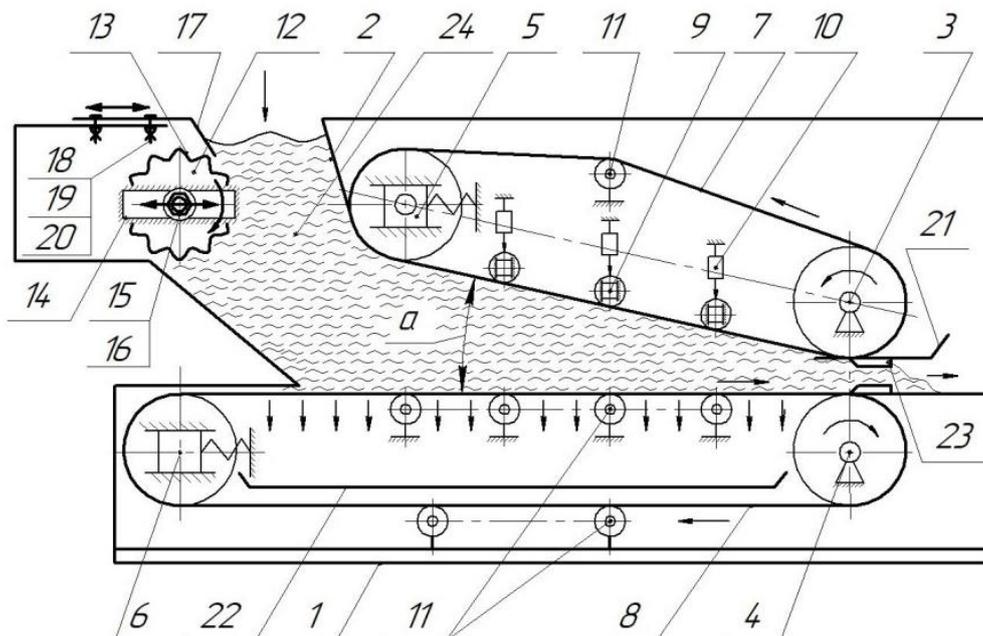


Рис. 1. Конструкция ленточного фильтр-пресса непрерывного действия с равномерной подачей отжимаемого материала в прессовое пространство

Фильтр-пресс состоит из рамы 1 с загрузочным окном 2. На раме установлены приводные валы – верхний 3 и нижний 4 (привод не показан), а также натяжные валы – верхний 5 и нижний 6, на которых установлены фильтровальные полотна – верхнее 7 и нижнее 8, при этом верхнее фильтровальное полотно установлено под углом α к нижнему фильтровальному полотну. На верхнем фильтровальном полотне установлены нажимные ролики 9 с гидроцилиндрами 10 и опорный ролик 11. На нижнем фильтровальном полотне также установлены опорные ролики 11. Напротив верхнего натяжного вала 5 и параллельно ему установлен приводной вал-активатор 12, на наружной поверхности которого выполнены волнообразные выступы 13, параллельные оси вала-активатора, который может перемещаться в горизонтальных направляющих 14 с фиксацией вала-активатора гайками 15 и шайбами 16. Над валом установлен козырек 17, фиксируемый в заданном положении болтами 18, гайками 19 и шайбами 20. Для удаления отжатой воды с верхнего фильтровального полотна установлен поддон 21, а с нижнего фильтровального полотна – поддон 22. На приводных валах установлены счищающие ножи 23. Внутреннее пространство фильтр-пресса заполнено отжимаемым материалом 24.

Вал-активатор (рис. 2) приводится во вращение приводом 25 с регулируемой частотой вращения. Это позволяет синхронизировать окружную скорость вала-активатора и линейную скорость движения верхнего фильтровального полотна. При этом вращение приводного вала-активатора, установленного напротив верхнего натяжного вала и параллельно ему, обеспечивает совместно с движущимся верхним фильтровальным полотном равномерную подачу отжимаемого материала в прессовое пространство за счет волнообразных выступов на валу-активаторе. Возможность перемещения оси вала-активатора в горизонтальных направляющих позволяет регулировать площадь загрузочного окна в зависимости от плотности подаваемого на отжим материала: чем меньше плотность, тем больше площадь окна, и наоборот.

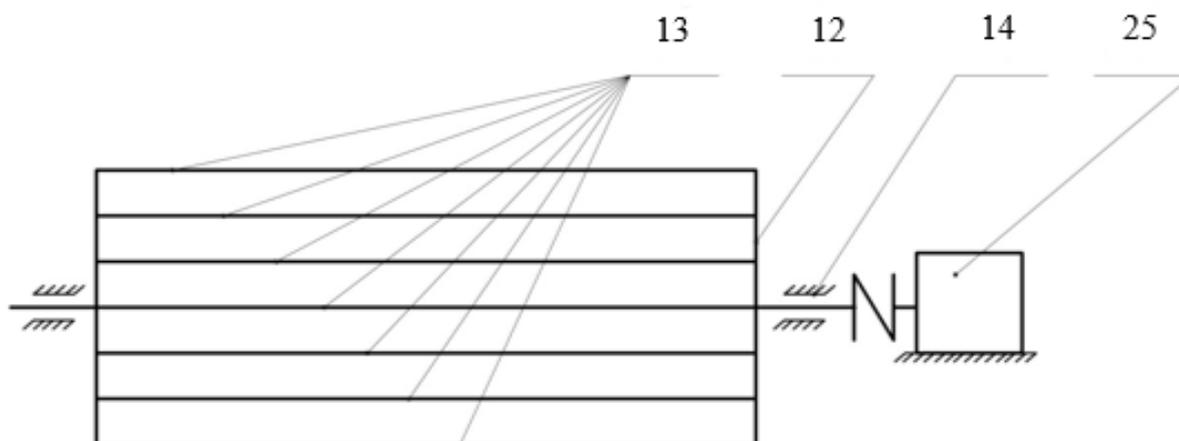


Рис. 2. Вал-активатор с регулируемой частотой вращения

Козырек, установленный над валом-активатором, препятствует попаданию на него сверху отжимаемого материала.

Фильтр-пресс работает следующим образом. Сначала, в зависимости от физико-механических характеристик отжимаемого материала, передвигением вала-активатора с приводом в направляющих устанавливается необходимая площадь загрузочного окна, с фиксацией вала гайками и шайбами. Козырек закрепляется над валом-активатором с помощью болтов, гаек и шайб. Затем устанавливается

необходимая частота вращения вала-активатора, при которой окружная скорость вала-активатора равна линейной скорости движения верхнего фильтровального полотна.

Затем приводятся в вращение приводные валы и вал-активатор, после чего в загрузочное окно 2 непрерывно подается отжимаемый материал. При этом движущееся верхнее фильтровальное полотно совместно с вращающимся валом-активатором способствуют активному продвижению поступающего отжимаемого материала в прессовое пространство, предотвращая зависание материала в зоне его загрузки. Отфильтрованная вода с верхнего фильтровального полотна стекает в поддон, а с нижнего – в поддон, после чего отводится в канализацию.

Отжатый материал после фильтрации счищается с поверхности фильтровальных полотен ножами и поступает на дальнейшую переработку.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Предложена конструкция ленточного фильтр-пресса непрерывного действия с равномерным поступлением отжимаемого материала по всей площади загрузочного окна.
2. Напротив верхнего натяжного вала установлен вал-активатор, привод которого выполнен с возможностью регулирования частоты вращения.
3. Загрузочное окно выполнено с возможностью регулирования его площади.
4. Предложенные технические решения обеспечивают повышение производительности фильтр-пресса и качества отжатого материала по получаемой влажности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Горячев В.И. Искусственное обезвоживание торфа: монография. Тверь: ТвГТУ. 2012. 184 с.
2. Справочник по торфу / под ред. Лазарева А.В., Корчунова С.С., Соколова Б.Н. М.: Недра. 1982. 760 с.
3. Doskočil L., Grasse L., Valkova D., Pekar M. Hydrogen Peroxide Oxidation of Humic Acids and Lignite // *Fuel*. 2014. V. 134, pp. 406–413.
4. Могилевский И.И. Теоретическое исследование обезвоживания торфа в прессах непрерывного действия: Сб. науч. тр. / ВНИИТП. Л. 1973. Вып. 33. С. 75–91.
5. Lamar R.T., Olk D.C., Mayhew L., Bloom P.R. A New Standardized Method for Quantification of Humic and Fulvic Acids in Humic Ores and Commercial Products // *Journal of AOAC International*. 2014. V. 97. № 3, pp. 721–730.

TAPE FILTER PRESS OF CONTINUOUS ACTION WITH UNIFORM SUPPLY OF WRUNG-OUT MATERIAL IN PRESS SPACE

I.I. MIKHEYEV, Cand Sci, V.I. GORYACHEV, Dr Sci,
D.M. SCHERBAKOVA

Tver State Technical University, 22, Af. Nikitin emb., 170026, Tver,
Russian Federation, e-mail: mikheev1937@yandex.ru

The design of a continuous belt filter press with a uniform supply of the pressed material into the press space has been developed. In existing belt filter presses, the pressed material is actively fed into the press space from the loading window only in contact

with the moving upper filter cloth mounted on the tension shaft. As you move away from it, the probability of material hanging in the loading window with its subsequent collapse increases, as a result of which the pressed material moves in the press space with a density greater or less than the actual one. The thickness of the pressed material layer is also changed. There is also no possibility of adjusting the area of the loading window of the filter press, which does not allow to change the volume of the material supplied to the extraction. All this reduces the productivity of the filter press and the quality of the product at the required humidity. To eliminate these shortcomings, has been developed design of the filter press, in which a drive shaft-activator is installed opposite the tension shaft, the rotation of which, together with a moving upper filter cloth, ensures a uniform supply of the squeezed material over the entire area of the loading window, which is made with the possibility of adjusting its area. As a result, the productivity of the filter press increases and the quality of the product obtained at the required humidity improves.

Keywords: belt filter press out the shaft-activator, press material, uniform density, adjustable frequency of rotation of the shaft, the boot window, improving performance.

REFERENCES

1. Goryachev V.I. *Iskusstvennoye obezvoživaniye torfa: monografiya* [Artificial dehydration of peat: monograph]. Tver: TvSTU. 2012. 184 p.
2. Spravochnik po torfu [Handbook on the peat] pod red. Lazareva A.V., Korchunova S.S., Sokolova B.N. Moskow: Nedra. 1982. 760 p.
3. Doskočil L., Grasse L., Valkova D., Pekar M. Hydrogen Peroxide Oxidation of Humic Acids and Lignite *Fuel*. 2014. V. 134, pp. 406–413.
4. Mogilevsky I.I. Theoretical study of the dehydration of peat in presses of continuous action. Collection of scientific papers / VNIITP. L. 1973. V. 33, pp. 75–91. (In Russian).
5. Lamar R.T., Olk D.C., Mayhew L., Bloom P.R. A New Standardized Method for Quantification of Humic and Fulvic Acids in Humic Ores and Commercial Products *Journal of AOAC International*. 2014. V. 97. No 3, pp. 721–730.

ВЛИЯНИЕ ТОРФЯНОЙ СРЕДЫ НА УСТАЛОСТНОЕ ПОВРЕЖДЕНИЕ РАБОЧИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ

И.К. МОРОЗИХИНА, канд. техн. наук, В.Е. ХАРЛАМОВ, канд. техн. наук,
К.С. КРЫЛОВ, канд. техн. наук

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

Интенсивность изнашивания рабочих поверхностей деталей горных машин зависит от многих факторов, непрерывно изменяющихся в процессе работы сопряжения, учесть которые в расчетах не представляется возможным. Поэтому для оценки действительной долговечности деталей горных машин следует использовать экспериментально определенную интенсивность износа, близкую к условиям реальной эксплуатации. Роль смазочного масла в развитии усталостного выкрашивания до конца не раскрыта, хотя результаты проведенных исследований указывают на возможное снижение питтинга (т.е. отделения металлических частиц) путем изменения не только вязкости масла, но и его химического состава. Процессы изнашивания и усталостного выкрашивания могут протекать одновременно и выступать как взаимосвязанные явления. Степень влияния изнашивания на процесс усталостного выкрашивания контактирующих поверхностей зубьев изучена недостаточно. Изменение кинематики и динамики зубчатых передач в результате износа профиля зубьев может привести к существенному изменению напряженного состояния в зоне контакта и созданию благоприятных условий для возникновения очагов усталостного выкрашивания.

Ключевые слова: горные машины, изнашивание, зубчатая передача, усталостное выкрашивание, смазочное масло, долговечность деталей машин.

ВВЕДЕНИЕ

Интересы любого современного производства, в том числе и горного, требуют, чтобы машины и оборудование работали бесперебойно в течение всего заданного межремонтного цикла. Достижение поставленной цели возможно исключением причин, вызывающих поломки деталей.

В процессе работы горных машин изменения в его узлах и системах возникают под воздействием как технологических нагрузок, так и внешней среды. На износ горных машин большое влияние оказывают условия их работы, специфичные для горных предприятий [1]: наличие больших динамических и особенно знакопеременных нагрузок; высокая агрессивность окружающей среды в связи с избытком влаги, пыли и вредных газов; более тяжелые условия труда рабочих, что отрицательно сказывается на качестве ухода за оборудованием, и другие факторы.

К любой выпускаемой машине предъявляется ряд требований, зависящих от специфики ее работы, необходимых удобств обслуживания и ремонта, стоимости самой машины и трудоемкости выполняемых ею работ. Основными из них являются машиностроительные, эксплуатационные, ремонтные и экономические. Применительно к горным машинам все эти требования имеют свои особенности. К требованиям машиностроительного характера относятся надежность и технологичность конструкции.

Горная машина должна быть прежде всего надежной. При ее создании максимально учитывают специфику работы и величину случайных нагрузок, которыми изобилует процесс горного производства. В связи с этим основное требование к горной машине – ее

достаточная прочность. Машины работают в условиях агрессивной среды. Кроме того, узлы и элементы взаимодействуют между собой. Поэтому трущиеся поверхности нужно тщательно изолировать от воздействия внешней среды уплотнительными устройствами.

Работоспособность и долговечность горных машин и оборудования в значительной степени зависят от качества смазочных материалов [2]. Высококачественная смазка повышает производительность и снижает эксплуатационные расходы, снижает потери мощности на трение, уменьшает изнашивание деталей, стабилизирует температуру их нагрева, предохраняет от коррозии, уплотняет зазоры, амортизирует ударные нагрузки в сочленениях.

Механический износ, независимо от его вида, наступает в результате возникновения в поверхностном слое металла напряжений, способных вызвать остаточные деформации.

В результате многократного деформирования поверхностных микрообъемов материала при обильной смазке зоны контакта может произойти усталостное повреждение рабочих поверхностей деталей горных машин. Это может привести к возникновению микротрещин и питтингу. Данный процесс носит усталостный характер и проявляется не сразу. Выкрашивание возникает вследствие накопления определенного числа циклов нагружений и зависит от выносливости материала поверхностных слоев, свойств смазочного масла, величины и направлений скоростей качения и скольжения, шероховатости поверхностей и некоторых других, менее существенных факторов. Цель настоящей работы – изучить влияние торфяной среды на усталостное изнашивание рабочих поверхностей деталей горных машин.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Чаще всего на рабочих поверхностях зубьев шестерен, на которые воздействуют значительные силы трения, вызванные скольжением, наблюдается поверхностное зарождение микротрещин. Они в первую очередь появляются в местах дефектов обработки поверхности (обработанные риски), у концентраторов напряжений, образовавшихся на границах ожога при шлифовании, в местах неравномерно наклепанного слоя при упрочнении, где пластическая деформация приводит к взаимодействию дислокаций (линейных дефектов кристаллической решетки, нарушающих правильное чередование атомных плоскостей) [3] или скоплению вакансий (структурных дефектов кристаллической решетки, связанных с отсутствием атомов или ионов). В работах [4–6] отмечается, что на твердых ($HV > 350$) рабочих поверхностях зубьев, работающих при обильной смазке контактируемых поверхностей, выкрашивание в большинстве случаев имеет прогрессирующий характер. Этот процесс обусловлен наличием постоянного разделительного масляного слоя и отсутствием запыливания раковин пластичным металлом подкоркового слоя, характерного для относительно мягких материалов ($HV < 350$). Возникает оно всегда в зоне однопарного зацепления вблизи полюсной линии на отстающей поверхности (ножке зуба). Скорости качения и скольжения направлены в разные стороны и микротрещины ориентированы своими выходами на поверхность в сторону линии контакта. При этом выход микротрещины на поверхность попадает в зону высокого гидравлического давления, что способствует нагнетанию масла в ее полость. При дальнейшем повороте зубчатого зацепления микротрещина закрывается сопряженной поверхностью, выход масла из нее становится невозможным. В образовавшейся полости под нагрузкой возникает высокое давление масла, расширяющее стенки микротрещины. При повторных нагружениях микротрещина растет и проникает с поверхности в тело зуба под острым углом на глубину 0,25...0,30 мм [7]. В дальнейшем микротрещина изменяет свое направление и идет параллельно поверхности зуба. При многократных повторениях

нагрузки микротрещина снова выходит на поверхность. Таким образом, кусочек металла отделяется от рабочей поверхности зуба. В результате процесс усталостного выкрашивания на рабочей поверхности ножки зуба ускоряется.

Влияние смазочного масла на развитие усталостного выкрашивания до конца не раскрыто. В проведенных исследованиях [8–11] показано, что на возможное ослабление развития питтинга оказывает влияние не только вязкость масла, но и его химический состав. Исследователи [8, 9] связывают динамику образования питтинга только с вязкостью смазочного масла. Это объясняется тем, что с ее увеличением возрастает толщина масляного слоя, уменьшается коэффициент трения, выравниваются контактные напряжения, быстрее рассасываются местные поверхностные напряжения, эффективнее гасятся удары входящих в зацепление зубьев, масло медленнее проникает в микротрещины и, следовательно, меньше способствует питтингообразованию. При использовании масел различного химического состава нельзя пренебрегать химическим влиянием на усталостную долговечность [10]. В [11] доказано, что физико-химические свойства промышленных смазочных масел на 5...10 % снижают предел выносливости материала зубьев по сравнению с пределом выносливости, установленным без использования масла. В ряде случаев при введении в их состав нескольких процентов поверхностно-активных добавок (жирных кислот) снижение выносливости может достигать 20 %.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На предел контактной выносливости материала влияют многие факторы, прежде всего количество масла, подаваемого в зацепление [4, 5]. Замена способа смазки зубчатого зацепления окунанием на более обильную принудительную смазку поливанием ведет к уменьшению предела контактной выносливости материала зубьев.

Как известно, увеличение твердости поверхностного слоя зуба способствует повышению сопротивления усталостному выкрашиванию. Сначала на закаленных рабочих поверхностях зубьев появляются мельчайшие бесформенные ямки. В дальнейшем скалывание частичек металла с их стенок вследствие хрупкости структуры материала ведет к увеличению площади ямок. Процесс усталостного выкрашивания ускоряется.

Химически агрессивные среды существенно снижают выносливость сталей [12]. К факторам, влияющим на интенсивность снижения выносливости, относятся химический состав стали, ее механическая и термическая обработка, химические свойства агрессивной среды, напряженное состояние, частота приложения нагрузки.

На рис. 1 представлены кривые усталости для образцов из стали 20X, испытанных в различных средах [11]. Можно отметить, что длительный предел выносливости стали 20X при работе в поверхностно-активной среде (кривая 2) по сравнению с длительным пределом выносливости этой же стали при работе в неактивной среде (кривая 1) снижается на 6,9 %. Однако при работе в химически агрессивной среде (кривая 3) снижение составляет уже 27,6 %.

При этом кривая усталости, полученная при работе в химически агрессивной среде, не приближается асимптотически к прямой, параллельной оси абсцисс (длительному пределу выносливости), а продолжает снижаться с некоторой интенсивностью. Поэтому в расчете принят условный длительный предел выносливости. Что касается растворов электролитов, то интенсивность снижения выносливости оказывается больше, чем в чистой воде.

По мнению авторов [13], вода, находящаяся в микротрещинах, влияет на снижение контактной усталости металла зубчатых колес. Смазочный материал заполняет эти капилляры, а растворенная в нем вода конденсируется в вершинах трещин, образуя богатую водой фазу. Циклические напряжения, сконцентрированные у вершины трещины, водная коррозия и водородное охрупчивание действуют совместно,

увеличивая скорость роста микротрещин. Как показали исследования [14], процесс наводороживания поверхности металла происходит при высоких амплитудах нагружения деталей в кислых средах и приводит к охрупчиванию и интенсификации разрушения деталей. Указанные условия соответствуют условиям работы деталей и механизмов машин, разрабатывающих поверхностный слой торфяных месторождений.

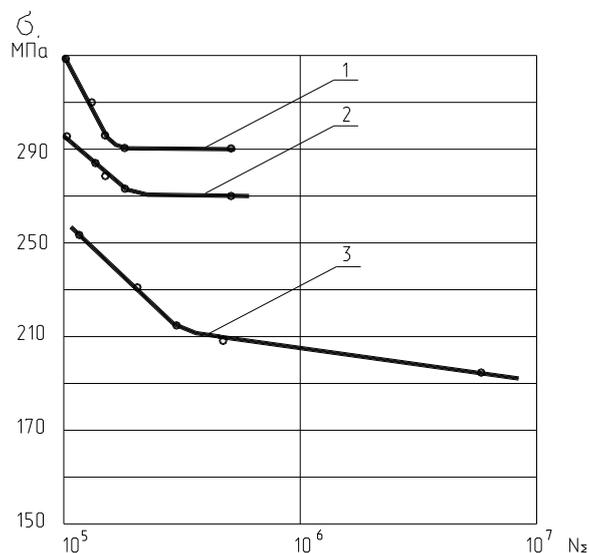


Рис. 1. Кривые усталости для образцов из стали 20X, испытанных в различных средах: 1 – в воздухе; 2 – в активизированном масле; 3 – в воде

Наличие твердых механических примесей в трансмиссионном масле резко ускоряет процесс выкрашивания рабочих поверхностей шестерен зубчатого зацепления, поскольку твердые минеральные частицы, находящиеся в зоне контакта, являются концентраторами повышенных пластических деформаций поверхности [15]. Такое влияние наиболее вероятно только вблизи полюсной линии. В этих местах практически отсутствует скольжение зуба шестерни по зубу колеса, наблюдается чистое качение.

Торфяная пыль представляет собой полидисперсный, физически и химически неоднородный материал, основой которого является органическая масса. В ней сосредоточены вода, свободные кислоты и минеральные частицы. Каждый из этих факторов по-разному влияет на интенсивность процесса усталостного выкрашивания рабочих поверхностей деталей. При их совместном влиянии интенсивность процесса усталостного выкрашивания зависит от их концентрации в масле. При значительных концентрациях воды, свободных кислот и минеральных частиц процесс усталостного выкрашивания ускоряется. Однако большой объем органической массы в торфяной пыли может нейтрализовать это влияние и даже замедлять процесс. Фактическое воздействие торфяной пыли на интенсификацию усталостного выкрашивания можно распознать только экспериментально для реальных условий эксплуатации.

Опыт эксплуатации трансмиссий тракторов, имеющих твердость рабочих поверхностей шестерен HRC 57...63, показывает, что после начала усталостного выкрашивания при наработке 3 000 моточасов зубчатые колеса остаются работоспособными в течение периода, в 2...3 раза превышающего наработанный, соответствующий появлению начального выкрашивания. При этом максимальная площадь выкрашивания на рабочих поверхностях шестерен доходит до 60...70 %.

В инженерной практике принято связывать сопротивление материала детали при нагружении силами с площадью ее опасного сечения. В качестве меры повреждения

принимают отношение площадей зон усталостного повреждения к номинальной рабочей площади. Это отношение называют степенью повреждения.

Определение предела усталостного выкрашивания сопряжено с рядом трудностей, так как профили зубьев по окружности колеса повреждаются неравномерно. Так, повреждение одного зуба может быть во много раз больше повреждения другого зуба. Поэтому в качестве критерия усталостной прочности рекомендуют принимать среднее повреждение поверхностей, которое линейно увеличивается с ростом числа циклов нагружения при постоянной нагрузке [16]. Подобной зависимости не наблюдается при рассмотрении взаимосвязи с максимальными повреждениями. Поэтому в качестве предельного выкрашивания принимается среднее однопроцентное повреждение рабочей поверхности зубьев. При этом, как показывает практика, максимальное выкрашивание может составлять от 2 до 15 %. В общем машиностроении недопустимым считают повреждение, соответствующее 0,5 % для закаленных зубьев и 2 % для термоулучшенных зубьев. Что касается трансмиссий торфяных машин, то предельно допустимая площадь выкрашивания рабочей поверхности зуба колеса редуктора не должна превышать 15 % общей площади зуба [17].

Мартин и Камерон предложили метод определения начала прогрессирующего выкрашивания деталей машин [18]. Они установили, что на участке прогрессирующего усталостного выкрашивания обычно наблюдается линейная зависимость площади раковин от логарифма числа циклов нагружений. Если эту прямую экстраполировать до оси абсцисс (рис. 2), то на последней будет отсечено количество циклов N , соответствующее началу прогрессирующего выкрашивания при данных условиях испытаний.

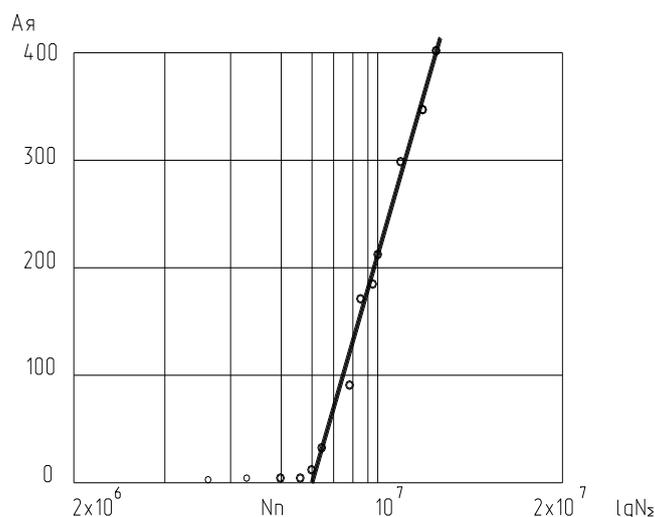


Рис. 2. Зависимость суммарной площади ямок от логарифмов числа циклов

У зубчатых колес, работающих при герцевском контакте, вся передаваемая нагрузка воспринимается узкой прямоугольной площадкой упругой деформации, перемещающейся по рабочей поверхности зуба. Наличие на последней раковин усталостного выкрашивания приводит, при наложении площадки контакта опережающей поверхности на поврежденный участок отстающей поверхности, к уменьшению площади, воспринимающей нагрузку, что ухудшает условия смазки, которая легко выдавливается в образовавшиеся раковины. При этом резко увеличивается удельное давление, что, в свою очередь, приводит к пластической деформации рабочих поверхностей зубьев. В месте контакта происходит разрыв масляной пленки, в результате чего в некоторых случаях наблюдается интенсивный износ и даже заедание

[6, 12]. Со временем происходит рост размеров и слияние отдельных раковин. Геометрия рабочих поверхностей зубьев в зацеплении сильно искажается. Это приводит к усилению вибрационно-акустической активности работающих механизмов и, как следствие, к повышению уровня шума и росту динамических нагрузок, из-за которых нормальная эксплуатация передач становится невозможной [19].

На рис. 3 представлены результаты испытания на поверхностное выкрашивание роликов, изготовленных из цементированной закаленной стали 18ХГТ (0,21 % С; 0,64 % Cr; 1,2 % Mn; 0,09 % Ti, основа – Fe) при твердости поверхности HRC 60...62 и глубине слоя цементации 1,1 мм. Скорость скольжения в зоне контакта роликов соответствовала 1,27 м/с; для смазки применялось автотракторное масло с противозадирной присадкой. Из графика видно, что длительный предел контактной выносливости $\sigma_{H \text{ lim } b}$ для этой стали равен 186 МПа при базовом количестве циклов нагружения $N_{OH} = 5 \cdot 10^6$. Расчетные значения указанных параметров для этой же стали в соответствии с рекомендациями работы [20]:

$$\sigma_{H \text{ lim } b} = 26 HRC_{cp} = 26 \frac{60 + 62}{2} = 1586 \text{ МПа};$$

$$N_{OH} = 30 \cdot (HRC_{cp} \cdot 10)^{2,4} = 30 \cdot \left(\frac{60 + 62}{2} \cdot 10\right)^{2,4} = 14,5 \cdot 10^7.$$

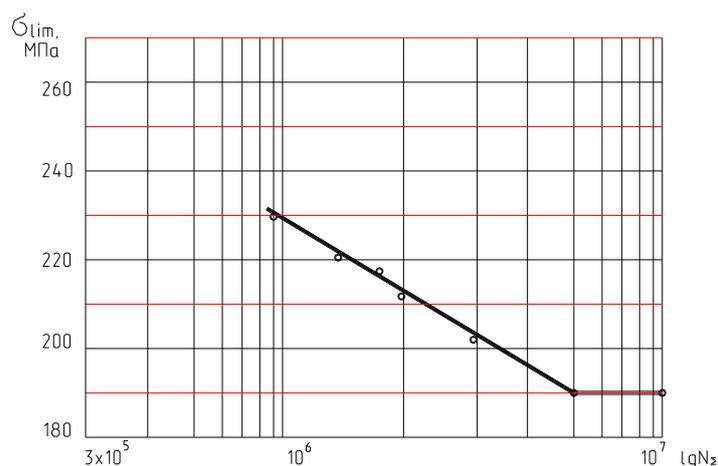


Рис. 3. Кривая поверхностного выкрашивания (опыты И.И. Дымшица)

Расчетный предел контактной выносливости оказывается больше экспериментального значения в 8,5 раза, а расчетное базовое число циклов нагружения – в 29 раз. Таким образом, можно предположить, что автотракторное масло с противозадирной присадкой существенно ускоряет процесс усталостного выкрашивания рабочих поверхностей зубьев.

Как указывается в работе [21], в качестве критерия предельного состояния зубьев по степени выкрашивания следует использовать коэффициент K_{II} :

$$K_{II} = A_{II} / A_P,$$

где A_{II} и A_P – поврежденная и полная площади пятен контакта всех зубьев колеса или шестерни соответственно. Коэффициент K_{II} не должен превышать 0,5, так как при больших его значениях начинается интенсивное выкрашивание и смятие рабочих поверхностей зубьев.

Опыт эксплуатации зубчатых передач показал, что они могут полноценно работать даже при некотором повреждении зуба выкрашиванием. Однако ГОСТ 21354-87 и рекомендации ИСО не содержат четких количественных критериев оценки допустимой степени данного повреждения. Такая оценка, по-видимому, не является однозначной, так как должна отражать специфику эксплуатации в своей отрасли материального производства и надежно определяется экспериментальным путем.

В исследованиях долговечности редукторов отмечается, что зависимость между относительной площадью выкрашивания и временем ее появления носит четко выраженный линейный характер, соответствующий постоянной интенсивности выкрашивания.

Переменную интенсивность выкрашивания демонстрируют результаты исследования на контактную выносливость цилиндрических зубчатых шестерен из стали 40Х с твердостью рабочей поверхности HRC 48...51, представленные на рис. 4. По оси ординат отложено отношение общей площади всех зубьев шестерни, пораженной выкрашиванием, к суммарной площади пятен контакта, выраженное в процентах, а по оси абсцисс – продолжительность работы передачи в часах.

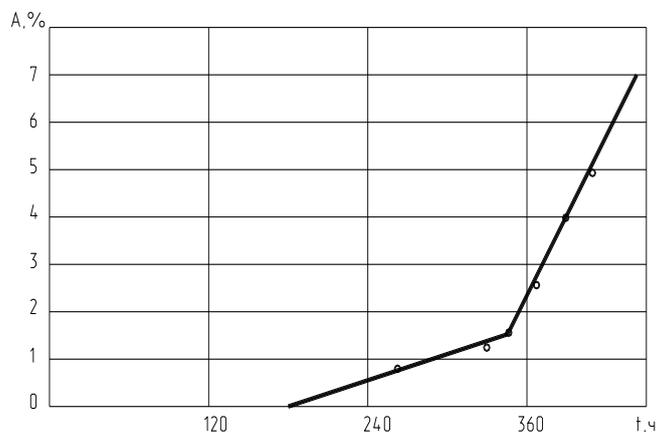


Рис. 4. Кривая предельного состояния шестерни

Как видно из расположения экспериментальных точек, прогрессирующее выкрашивание возникает после 260 часов работы передачи. В дальнейшем развитие процесса протекает с различной интенсивностью. До 340 часов работы шестерен зацепления под нагрузкой интенсивность выкрашивания постоянна и равна 0,011 %/ч. После 340 часов работы она резко возрастает и соответствует 0,55 %/ч.

Прогрессирующее выкрашивание может также изменяться циклически, когда периоды нарастающего выкрашивания сменяются периодами его стабилизации при наличии выравнивания и упрочения поверхности. Указанное явление не имеет надежного физического объяснения, что не позволяет до сих пор предложить математическое решение проблемы усталостного выкрашивания с целью оценки долговечности зубчатых передач [16].

Надежному аналитическому решению проблемы усталостного выкрашивания с целью оценки долговечности зубчатых передач в последнее время уделяется все большее внимание [22]. Так, на основании допущения о линейной зависимости интенсивности поверхностного выкрашивания от приложенного давления, которое, в свою очередь, пропорционально площади выкрашивания, получена экспоненциальная зависимость увеличения площади поверхностного выкрашивания зубьев коробки передач от пробега автомобиля:

$$A = A_0 \cdot e^{\epsilon \cdot l}, \quad (1)$$

где A_0 – начальная площадь выкрашивания; e – основание натурального логарифма; ϵ – коэффициент интенсивности выкрашивания; l – пробег автомобиля.

Экспериментальная проверка подтвердила возможность использования предложенной аналитической зависимости в проектах. На основании результатов исследования суммарной площади выкрашивания поверхности зубьев ведущей шестерни главной передачи в процессе эксплуатации автомобиля ЗИЛ-130 рекомендованы следующие численные значения постоянных, которые представлены в таблице [22].

Постоянные коэффициенты зависимости (1)

Постоянные	Размерность площади поверхностного выкрашивания	
	мм ²	%
A_0	106,77	1,452
ϵ	0,007 34	0,007 35

В аналитическом выражении расчета меры повреждения рабочих поверхностей зубьев усталостным выкрашиванием использована гипотеза суммирования усталостных повреждений [22]. На основании предположения о том, что необратимая работа деформации, связанная с рассеиванием энергии на механический гистерезис в детали за N_i число циклов нагружений, суммируется, повреждаемость можно вычислять по следующей аналитической зависимости:

$$D_{\Pi} = \frac{\sigma_i^m \cdot N_i}{\sigma_{-1}^m \cdot N_0},$$

где σ_i – действующие контактные напряжения; m – показатель степени, уточняемый экспериментально; σ_{-1} – длительный предел выносливости материала детали по контактным напряжениям; N_0 – базовое количество циклов нагружения.

Анализируя представленную зависимость, можно отметить, что если повреждение $D_{\Pi} < 1,0$, то численная ее величина характеризует отсутствие усталостного выкрашивания. При $D_{\Pi} = 1,0$ появляется усталостное выкрашивание на рабочих поверхностях зубьев; при $D_{\Pi} > 1,0$ усталостное выкрашивание интенсивно развивается.

Для зубчатых передач общего назначения допустимую степень повреждения рабочих поверхностей зубьев и соответствующую ей долговечность можно вычислить по следующим аналитическим формулам:

$$D_B = \left(\frac{\beta}{\rho \cdot \gamma \cdot l_n \cdot \sigma_i} \right)^{\frac{1}{\gamma}},$$

$$N_B = \mu \cdot \left(\frac{\beta}{l \cdot \rho \cdot \gamma \cdot \ln \sigma_i} \right)^{\frac{\beta}{\gamma}},$$

где β , ρ , γ , μ – постоянные, определяемые на основе экспериментальных данных и учитывающие вид зубчатых передач, материал и условия контактирования. Экспериментально установлены следующие значения постоянных для прямозубых зубчатых колес

с модулем $m = 4$ мм, твердостью рабочих шлифованных поверхностей зубьев HRC 52, полученной с помощью закалки ТВЧ: $\beta = 8,44$; $\rho = 6,43$; $\gamma = 0,153$; $\mu = 1,76 \cdot 10$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализируя методы аналитических решений проблемы усталостных выкрашиваний, можно отметить, что представленные расчетные зависимости не имеют широкого распространения в связи с наличием экспериментальных коэффициентов, определяемых для конкретных условий эксплуатации. Это обстоятельство требует проведения обширных экспериментальных исследований, тем самым ценность полученных аналитических уравнений снижается.

ЛИТЕРАТУРА

1. Трегубов Н.М., Акастелов Л.Ф. Ремонт горных машин. М.: Недра. 1978. 177 с.
2. Курбатова О.А., Павлюченко В.М. Монтаж и ремонт горных машин и электрооборудования. Владивосток: ДВГТУ. 2004. 286 с.
3. Васильева Л.С. Автомобильные эксплуатационные материалы: учебник для вузов. М.: Наука-Пресс. 2003. 421 с.
4. ГОСТ 21354-87. Передачи зубчатые, цилиндрические, эвольвентные внешнего зацепления. Расчет на прочность. М.: Изд-во стандартов. 1988. 36 с.
5. Трибология и надежность машин: сб. науч. трудов / АН СССР, ред. В.С. Авдудевский, Ю.Н. Дроздов. М.: Наука. 1990. 144 с.
6. Цуркан А.Г. Опыт статистического исследования режима работы машины УМПФ // *Технология производства и переработки торфа: сб. науч. трудов КПИ*. М.: Недра. 1970. С. 96–100.
7. Лукьянчиков А.Н., Морозихина И.К., Харламов В.Е., Крылов К.С. Изнашивание зубчатых передач привода фрезерующих торфяных машин // *Вестник Тверского государственного технического университета*. 2004. № 4. С. 196–200.
8. Колосюк Д.С., Кузнецов А.В. Автотракторные топлива и смазочные материалы. К.: Вища школа. 1987. 191 с.
9. Решетов Д.Н. Детали машин. М.: Машиностроение. 1989. 496 с.
10. Сафонов Б.П., Бегова А.В. Инженерная трибология: оценка износостойкости и ресурса трибосопряжений. Новомосковск: Новомосковский институт. 2004. 66 с.
11. Карпенко Г.В. Прочность стали в коррозионной среде. М.: Машгиз. 1963. 188 с.
12. Морозихина И.К. Экспериментальное исследование влияния концентрации пыли в трансмиссионном масле на износ рабочих поверхностей зубьев // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2010. № 5. С. 74–76.
13. Гаркунов Д.Н. Триботехника. М.: Машиностроение. 1989. 328 с.
14. Третьяк Л.Н. Обработка результатов наблюдений: учеб. пособие. Оренбург: ГОУ ОГУ. 2004. 171 с.
15. Малкин В.С., Матвеев В.В. Количественная оценка герметичности трансмиссий трактора общего назначения // *Принудительная смазка трансмиссий сельскохозяйственных тракторов: Известия Куйбышевского сельскохозяйственного института*. 1970. Т. 27. Вып. 3. С. 59–66.
16. Флик Э.П. Механические приводы сельскохозяйственных машин. М.: Машиностроение. 1984. 272с.
17. Кузин Н.А., Страх В.Н. Техническое обслуживание и ремонт торфяных машин: учеб. пособие для техникумов. Мн.: Вышшая школа. 1987. 239 с.
18. Martin J.B., Cameron A. Effect of oil on the pitting of rollers // *Journal of Mechanical Engineering Science*, 1961, V. 3. № 2. P. 148–152.

19. Рыжкин А.А., Слюсарь Б.Н., Шучев К.Г. Основы теории надежности: учеб. пособие. Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ. 2002. 182 с.

20. Пиковский Я.М., Филиппов Б.И. Эксплуатация и испытания дорожных машин: учебник для вузов. М.: Высшая школа. 1973. 400 с.

21. Харламов В.Е., Морозихина И.К., Крылов К.С., Чугунов А.А. Определение режимов нагрузки привода фрезера для оценки изнашивающей способности зубчатых передач редукторов // *Вестник Тверского государственного технического университета*. 2006. № 8. С. 54–58.

22. Анилович В.Я. О математических моделях надежности объектов / *Надежность и долговечность машин и сооружений*. 1984. Вып. 6. С. 14–21.

INFLUENCE OF PEAT ENVIRONMENT ON FATIGUE DAMAGE OF WORKING SURFACES OF DETAILS

I.K. MOROZIKHINA, Cand Sci, V.E. HARLAMOV, Cand Sci,
K.S. KRYLOV, Cand Sci

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

The wear rate of the working surfaces of parts of mining machines depends on many factors continuously changing in the process of pairing, which cannot be taken into account in the calculations. Therefore, to assess the actual durability of parts of mining machines should be used experimentally determined wear rate, close to the conditions of actual operation.

The role of lubricating oil in the development of fatigue chipping is not fully disclosed, although the results of the studies indicate a possible decrease in pitting (i.e., separation of metal particles) by changing not only the viscosity of the oil, but also its chemical composition. The processes of wear and fatigue chipping can occur simultaneously and act as interrelated fact. The degree of wear effect on the process of fatigue chipping of the contacting surfaces of the teeth is not explored enough. Changes in the kinematics and dynamics of gears as a result of the wear of the tooth profile can lead to a significant change in the stress state in the contact zone and create favorable conditions for the occurrence of fatigue chipping focus.

Keywords: mining machines, wear, gear, fatigue chipping, lubricating oil, durability of machine parts.

REFERENCES

1. Ремонт горных машин: N.M. Tregubov, L.F. Akastelov. [Repair of mining machines] Moscow: Nedra. 1978. 177 p. (In Russian).

2. Kurbatova O.A., Pavlyuchenko V.M. Montazh i remont горных машин и электрооборудования [Installation and repair of mining machinery and electrical equipment] Vladivostok: DVG TU. 2004. 286 p. (In Russian).

3. Vasiliyeva L.S. Avtomobilnyye ekspluatatsionnyye materialy: ucheb. dlya vuzov. [Automotive maintenance materials: a textbook for high schools]. M.: Nauka-Press, 2003. 421 p. (In Russian).

4. GOST 21354-87. Peredachi zubchatyye, tsilindricheskiye, evolventnyye vneshnego zatsepleniya. Raschet na prochnost. [Transmission gear, cylindrical, involute external gearing. Calculation of strength]. Moscow: Izd-vo standartov. 1988. 36 p. (In Russian).

5. *Tribologiya i nadezhnost mashin*: Sb. nauch. tr. / AN SSSR, red. V.S. Avduyevskiy, Yu.N. Drozdov. [Tribology and machine reliability]. M.: Nauka, 1990. 144 p. (In Russian).

6. Tsurkan A.G. Opyt statisticheskogo issledovaniya rezhima raboty mashiny UMPF Tekhnologiya proizvodstva i pererabotki torfa: Sb. nauch. trudov KPI. [Experience of statistical research of the operating mode of the UMP machine]. Moscow: Nedra, 1970, pp. 96–100. (In Russian).

7. Lukiyanchikov A.N., Morozikhina I.K., Kharlamov V.E., Krylov K.S. Wear gears drive milling peat machines. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2004. № 4, pp. 196–200. (In Russian).

8. Kolosyuk D.S., Kuznetsov A.V. Avtotraktornyye topliva i smazochnyye materialy. [Autotractor fuels and lubricants]. Kyev: Vyshcha shkola, 1987. 191 p.

9. Reshetov D.N. Detali mashin: [Machine parts] Moscow: Mashinostroyeniye, 1989. 496 p. (In Russian).

10. Safonov B.P., Begova A.V. Inzhenernaya tribologiya: otsenka iznosostoykosti i resursa tribosopryazheniy. [Engineering tribology: assessment of wear resistance and tribo-resource life] Novomoskovsk. 2004. 66 p. (In Russian).

11. Karpenko G.V. Prochnost' stali v korroziionnoy srede. [Steel durability in the corrosion environment]. M.: Mashgiz, 1963. 188 p. (In Russian).

12. Morozikhina I.K. A pilot study of influence of concentration of dust in gearbox oil on wear of working surfaces of teeth. *Gorny informatsionno-analiticheskii byulleten*, 2010, No 5, pp. 74–76. (In Russian).

13. Garkunov D.N. Tribotekhnika [Tribotechnics]. Moscow: Mashinostroyeniye, 1989. 328 p. (In Russian).

14. Tretiyak L.N. Obrabotka rezultatov nablyudeniy: uchebnoye posobiye. [Treatment of observations: Textbook]. Orenburg: GOU OGU, 2004. 171 p. (in Russian).

15. Malkin V.S., Matveev V.V. Quantitative assessment of tightness of transmissions of the tractor of general purpose. *Prinuditelnaya smazka transmissiy sel'skokhozyaystvennykh traktorov: Izvestiya Kuybyshevskogo selskokhozyaystvennogo instituta*. 1970. V. 27, No 3, pp. 59–66. (In Russian).

16. Flik E.P. Mekhanicheskiye privody sel'skokhozyaystvennykh mashin. [Mechanical drives agricultural machines]. M.: Mashinostroyeniye, 1984. 272 p. (In Russian).

17. Kuzin N.A., Strakh V.N. Tekhnicheskoye obsluzhivaniye i remont torfyanykh mashin: Ucheb. posobiye dlya tekhnikumov. [Maintenance and repair of peat machines: Proc. manual for technical schools]. Minsk: Vysshaya shkola, 1987. 239 p.

18. Martin J.B., Cameron A. Effect of oil on the pitting of rollers. *Journal of Mechanical Engineering Science*, 1961. V. 3, No 2, pp. 148–152.

19. Ryzhkin A.A., Slyusar B.N., Shuchev K.G. Osnovy teorii nadezhnosti: Ucheb. posobiye. [Fundamentals of the theory of reliability: Textbook]. Rostov n/D: Izdatelskiy tsentr DGTU. 2002. 182 p. (In Russian).

20. Pikovskiy Ya.M., Filippov B.I. Ekspluatatsiya i ispytaniya dorozhnykh mashin: uchebnik dlya vuzov. [Operation and tests of road cars: The textbook for higher education institutions]. Moscow: Vysshaya shkola, 1973. 400 p. (In Russian).

21. Kharlamov V.E., Morozikhina I.K., Krylov K.S., Chugunov A.A. Determination of the load conditions of the mill drive to assess the wear capacity of gears of gearboxes // *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2006. № 8, pp. 54–58. (In Russian).

22. Anilovich V.Ya. About mathematical models of reliability objects / *Nadezhnost i dolgovechnost mashin i sooruzheniy*. 1984. No 6, pp. 14–21. (In Russian).

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 007:519.816

МЕТОДЫ И ПРОГРАММНЫЕ СРЕДСТВА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ДЛЯ МОНИТОРИНГА И УПРАВЛЕНИЯ СЛОЖНЫМИ ТЕХНИЧЕСКИМИ УСТРОЙСТВАМИ

А.П. ЕРЕМЕЕВ, д-р техн. наук

Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
11250, Москва, Красноказарменная ул., 14, e-mail: eremeev@apmat.ru

Данная статья написана по материалам доклада с аналогичным названием на «Золотовских чтениях», которые состоялись 2 ноября 2018 г. в Тверском государственном техническом университете. Описаны методы, модели и программные средства, разработанные на кафедре прикладной математики Национального исследовательского университета «Московский энергетический институт» (НИУ «МЭИ») в плане создания математического и программного обеспечения перспективных интеллектуальных систем поддержки принятия решений (ИСППР), в том числе наиболее сложных их представителей – ИСППР реального времени (ИСППР РВ), предназначенных для помощи оперативно-диспетчерскому персоналу при мониторинге и управлении сложными техническими (технологическими) объектами и системами на примере объектов энергетики. Исследования и разработки проводятся в рамках НИР по государственным и федеральным программам, грантам РФФИ (в том числе РФФИ № 17-07-00553а, 18-01-00007Бел-а, 18-01-00201а), а также по программам НИР НИУ «МЭИ».

Ключевые слова: искусственный интеллект, интеллектуальная система, поддержка принятия решений, реальное время, математическое обеспечение, программное обеспечение.

ВВЕДЕНИЕ

Кафедра прикладной математики (ПМ) стояла у истоков работ по тематике искусственного интеллекта и созданию перспективных интеллектуальных систем (ИС) семиотического типа, способных к адаптации и обучению [1, 2]. Идеологом этих исследований был профессор Д.А. Поспелов. Кафедра специализируется на разработке методов, моделей и программных средств для ИСППР РВ), предназначенных для помощи оперативно-диспетчерскому персоналу при мониторинге, диагностике и управлении сложными техническими и организационными системами и объектами типа энергообъектов и транспортных систем.

Разработаны и зарегистрированы в Федеральной службе по интеллектуальной собственности ряд программных средств для конструирования современных и перспективных ИС, ИСППР и ИСППР РВ, в том числе:

инструментальный комплекс проектирования систем поддержки принятия решений реального времени СИМПР-WINDOWS;

система моделирования временных рассуждений на базе точечной модели времени;

система извлечения из корпоративной памяти знаний, релевантных проблемной ситуации (СКП);

программный комплекс «Темпоральные деревья решений» (Temporal Decision Trees (TDT));

инструментарий для разработки моделей систем на основе темпоральных сетей Петри с поддержкой логики Аллена;

система аргументации на основе пересматриваемых рассуждений; модуль редактирования онтологий для интеллектуальной системы на основе прецедентов;

модуль ускорения поиска решения на основе модифицированного алгоритма Rete для нечеткой интеллектуальной системы;

модуль для оптимизации базы прецедентов СВР-систем.

Данные программные средства были применены при разработке прототипа ИСППР РВ для оперативно-диспетчерского персонала энергоблока АЭС, ИСППР РВ для управления автоматизированной транспортной парковкой и в других приложениях, а также в учебном процессе кафедры при подготовке бакалавров и магистров по направлению «Прикладная математика и информатика». По данной проблематике сотрудниками кафедры опубликовано более 300 статей (в журналах «Известия РАН. Теория и системы управления», «Российская академия наук. Искусственный интеллект и принятие решений», «Программные продукты и системы», «Программирование», «Вестник МЭИ» и др.) и докладов на российских и международных конференциях, выпущен ряд монографий, в том числе [3–6].

НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

В настоящее время основными направлениями исследований, проводимых на кафедре ПМ в рассматриваемой области, являются:

модели и методы на основе неклассических логик и вычислений: индуктивные и абдуктивные логики, темпоральные логики, активные логики, нечеткие логики и логики аргументации, модели на основе прецедентов и аналогий, ориентированные на представление и оперирование плохо определенной (так называемой «зашумленной») информацией;

гибридные интеллектуальные многоагентные системы, функционирующие в условиях жестких временных ограничений;

математическое и программное обеспечение перспективных ИС и ИСППР различного назначения, в том числе экспертных систем управления, поддержки принятия решений, обучающих систем, систем диагностики и мониторинга, онтологически ориентированных решателей, технологий Semantic Web и др.

На основе полученных теоретических результатов, моделей и методов разработан и зарегистрирован ряд программных средств, которые используются в научном и учебном процессах кафедры ПМ.

Остановимся на конструировании перспективных ИСППР РВ, расширяющих область применения ИС на плохо формализуемые динамические предметные / проблемные области при наличии достаточно жестких временных ограничений и различного типа неопределенности («зашумленности») в имеющейся информации.

Интеллектуальные системы поддержки принятия решений реального времени предназначены для помощи лицам, принимающим решения (ЛПР), при управлении сложными объектами и процессами различной природы в условиях жестких временных ограничений. Они относятся к классу интегрированных динамических ИС, сочетающих строгие математические методы и модели поиска решения с нестрогими

(эвристическими) логико-лингвистическими моделями и методами, базирующимися на знаниях специалистов-экспертов, моделях человеческих рассуждений, накопленном опыте.

Основным назначением ИСППР РВ является помощь ЛПР в удержании объекта в нормальном режиме функционирования или нормализации функционирования при различных отклонениях (аномальных, нештатных) в поведении объекта.

К основным функциям ИСППР РВ относятся:

1) *диагностика и мониторинг* – выяснение, где, когда и какого типа возникла проблемная ситуация;

2) *поиск решения (планирование)* – нахождение оптимальной или допустимой относительно заданного критерия (критериев) оценки последовательности действий по достижению поставленной цели;

3) *прогнозирование* – составление на модели прогноза развития ситуации для оценки эффективности рекомендуемых действий (решений) по разрешению проблемной ситуации;

4) *взаимодействие с ЛПР (экспертом)* – формирование базы экспертных знаний и выдача информации (рекомендации) ЛПР.

Реализовать ИСППР РВ в полном объеме возможно при использовании современных технологий конструирования ИС, основанных на концепциях распределенного искусственного интеллекта, прикладной семиотики, динамических моделей знаний, параллельной обработки информации, поиске решения на основе экспертных моделей и методов правдоподобного вывода, а также ориентации на мощные вычислительные платформы и соответствующие инструментальные комплексы [2, 5, 6].

В своей фундаментальной работе [7] Д.А.Поспелов предложил строить перспективные ИС нового поколения как *семиотические системы*, способные к развитию и адаптации. В настоящее время активно развивается направление искусственного интеллекта, названное *прикладной семиотикой*, объединяющее исследования в области семиотического моделирования, семиотических баз знаний, логико-лингвистических и когнитивных моделей, необходимые для создания высокоэффективных ИС, способных к обучению (адаптации) и функционированию в открытых и динамических проблемных / предметных областях.

Интеллектуальные системы поддержки принятия решений реального времени семиотического типа базируется на следующих основных принципах:

открытости и динамичности;

адаптивности и обучаемости;

распределенности и параллельности обработки информации;

применения когнитивной графики и гипертекста в отображении информации;

использования высокопроизводительной вычислительной техники, включая параллельные системы и кластеры, и эффективных инструментальных средств.

Формально ИСППР *семиотического типа* может быть задана набором [6]:

$$SS = \langle M, R(M), F(M), F(SS) \rangle,$$

где $M = \{M_1, \dots, M_n\}$ – множество формальных или логико-лингвистических моделей, реализующих определенные интеллектуальные функции; $R(M)$ – множество правил выбора необходимой модели или совокупности моделей в текущей ситуации, т.е. правил, реализующих отображение $R(M): S \rightarrow M$, где S – множество возможных ситуаций (состояний), которое может быть и открытым, или $S' \rightarrow M$, где S' – некоторое множество обобщенных ситуаций (состояний), например нормальных (штатных),

аномальных или аварийных (критических), при попадании в которые происходит смена модели; $F(M) = \{F(M_1), \dots, F(M_n)\}$ – множество правил модификации моделей $M_i, i = 1, \dots, n$. Каждое правило $F(M_i)$ реализует отображение $F(M_i): S'' \times M_i \rightarrow M'_i$, где $S'' \subseteq S, M'_i$ – некоторая модификация модели M_i ; $F(SS)$ – правило модификации собственно системы SS – ее базовых конструкций $M, R(M), F(M)$ и, возможно, самой $F(SS)$, т.е. $F(SS)$ реализует целый ряд отображений (или комплексное отображение) $F(SS): S''' \times M \rightarrow M', S''' \times R(M) \rightarrow R'(M), S''' \times F(M) \rightarrow F'(M), S''' \times F(SS) \rightarrow F'(SS)$, где $S''' \subseteq S, S''' \cap S' = \emptyset, S''' \cap S'' = \emptyset$. Правила модификации данного типа используются в ситуациях, когда имеющихся множеств моделей, правил выбора и правил модификации недостаточно для принятия решений в сложившейся проблемной ситуации. Для модификации $F(SS)$ могут быть использованы как внутренние средства порождения моделей и правил (гипотез), например в процессе самообучения ИСППР, так и внешние метазнания, отражающие прагматический аспект проблемной ситуации. На рис. 1 представлена обобщенная архитектура ИСППР РВ семиотического типа [1].

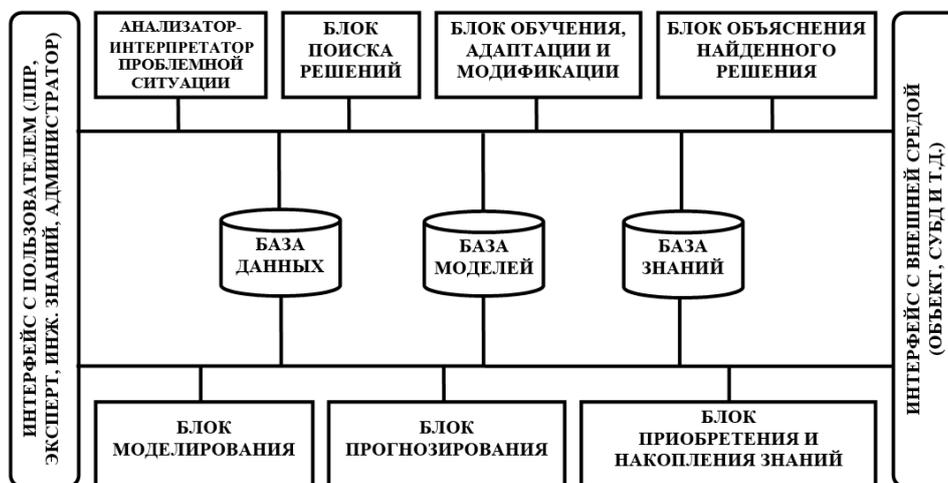


Рис. 1. Обобщенная архитектура ИСППР РВ

Кратко поясним назначение каждого блока-модуля [6].

Анализатор-интерпретатор проблемной ситуации интерпретирует, анализирует и классифицирует проблемную ситуацию, передавая соответствующую информацию блоку поиска решения и ЛПР.

Блок поиска решения в зависимости от данных анализатора и заложенных в систему (базу знаний) знаний выбирает из базы моделей необходимую для сложившейся ситуации модель (метод) поиска решения или их совокупность.

Блок обучения, адаптации и модификации реализует настройку, адаптацию и, при необходимости, обучение системы в целом или ее отдельных компонентов (например, пополнение базы знаний новыми знаниями, в частности прецедентами; пополнение базы моделей новыми моделями поиска решения, адекватными сложившейся проблемной ситуации, и т.д.), так как ИСППР РВ ориентирована на открытые и динамические предметные / проблемные области.

Блок объяснения найденного решения. Так как ИСППР – это советующие системы, реализующие в зависимости от проблемной ситуации и заложенных в систему знаний как достоверные, так и правдоподобные рассуждения – механизмы поиска (вывода) решения, и ЛПР выдается решение-рекомендация или несколько решений-рекомендаций, взвешенных соответствующими коэффициентами уверенности, то ЛПР

может потребовать посредством данного блока предоставить ему объяснение (обоснования) рекомендации, например в виде всей цепочки вывода решения.

Блок моделирования – необходимый атрибут динамических ИС типа ИСППР РВ, в функции которого входит моделирование как процессов, протекающих на управляемом объекте, например в случае отказа или неисправности соответствующих датчиков, так и возможных после принятия управляющих решений ситуаций, необходимых для работы блока прогнозирования. При использовании ИСППР РВ в режиме обучения (тренировки) ЛПР блок моделирования генерирует соответствующую обучающую выборку.

Блок прогнозирования прогнозирует (используя данные блока моделирования) последствия принимаемых управляющих решений и выдает полученные результаты ЛПР для окончательного принятия решений.

Блок приобретения и накопления знаний реализует функции как первичного приобретения знаний, например от специалистов – экспертов в данной предметной (проблемной) области, так и пополнения знаний системы (базы знаний) новыми знаниями в процессе обучения системы или ее эксплуатации.

База данных (называемая также *рабочей памятью*) используется для хранения как текущей информации, получаемой от объекта и / или внешней среды, так и промежуточных результатов, формируемых в процессе функционирования системы или ее отдельных модулей. База данных может быть структурирована с распределенным доступом.

База моделей содержит модели, реализующие различные методы поиска решений, причем как точные, базирующиеся на методах математической оптимизации и дающие достоверный результат, так и приближенные, эвристические, базирующиеся на экспертных знаниях и методах правдоподобного вывода в условиях различного типа неопределенности. База моделей используется блоками поиска решения, моделирования и прогнозирования для выбора адекватной модели или их совокупности.

База знаний – необходимый атрибут любой ИС, используемый при поиске решения. Знания могут быть как достаточно простыми (неструктурированными), представленными в виде продукционных правил вида «ЕСЛИ (условие применимости), ТО (результат, возможно с коэффициентом уверенности)», так и более сложными (структурированными, глубинными), представленными в структурированном виде – семантическими сетями, шаблонами-фреймами и т.п. База знаний также может быть структурирована и поддерживать распределенный доступ.

Интерфейс с пользователем осуществляет связь с пользователем системы. В развитых ИС интерфейс настраивается на различный тип пользователя – эксперта, инженера знаний, ЛПР, администратора системы и т.д.

Интерфейс с внешней средой используется в развитых ИС типа ИСППР РВ для связи с объектами (датчиками, контроллерами и т.п.), внешними программными модулями и системами (СУБД, пакетами прикладных программ и т.д.).

Таким образом, ИСППР РВ является системой распределенного интеллекта, состоящей из взаимодействующих между собой интеллектуальных блоков (модулей, агентов), выполняющих различные интеллектуальные функции. К числу таких блоков, помимо традиционных для ИС баз данных (БД) и знаний (БЗ), блоков поиска решения, приобретения и накопления знаний, объяснения и т.д., относятся блоки моделирования проблемной ситуации, обучения, прогнозирования, связи с внешними объектами (датчиками, контроллерами, концентраторами данных, управляющими приводами и т.д.), средства организации различного типа интерфейсов (образного, текстового, речевого, в виде графиков и диаграмм и т.д.) с пользователями (ЛПР, экспертом, инженером знаний, системным администратором). К интеллектуальным относятся

функции поиска (вывода) решения на базе моделей и методов представления и оперирования динамическими знаниями, характеризующимися различного рода неопределенностями. Поиск решения осуществляется с использованием механизмов эвристического поиска, экспертных функций оценки, нетрадиционных логик, моделирующих рассуждения специалиста-эксперта, и методов обучения.

Интеллектуальная система поддержки принятия решений реального времени позволяет ЛПР, управляющему сложным объектом, эффективно выполнять следующие функции:

- наблюдать за общим состоянием систем / подсистем объекта;
- по необходимости переключать внимание ЛПР на одну из систем или подсистем;
- наблюдать графики изменения текущих значений отдельных параметров;
- осуществлять мониторинг и диагностику состояний систем/подсистем или параметров;
- отслеживать процесс управления;
- прогнозировать состояние параметров;
- при необходимости вмешиваться в процесс управления, выдавая рекомендации ЛПР;
- прогнозировать последствия принимаемых решений.

Процесс принятия решений включает в себя следующие основные этапы:
восприятие и осмысление проблемной ситуации;
определение множества допустимых преобразований (действий) над ситуациями;
выбор необходимого или наиболее эффективного преобразования в данной ситуации;
оценку полученного или ожидаемого результата и его коррекцию (при необходимости).

Отметим, что если ко второму этапу ЛПР в определенной степени в состоянии подготовиться заранее (хотя может возникнуть необходимость в пополнении и коррекции множества преобразований непосредственно в процессе принятия решений), то все остальные этапы выполняются ЛПР в реальном времени, определяемом темпом управляемого процесса. А темпы эти таковы, что ЛПР, управляющий все более усложняющимися объектами и процессами (энергетическими, транспортными, производственными и т.д.), все чаще испытывает недостаток времени и подвергается стрессовым перегрузкам. Ответственность же ЛПР непрерывно возрастает. Принятие неадекватных или неэффективных решений может привести, как показывает практика, к серьезным материальным, а в ряде случаев и людским потерям.

ПРАКТИЧЕСКИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ

Практические приложения ИСППР РВ рассмотрим на примере оперативно-диспетчерского управления сложным объектом – подсистемами энергоблока АЭС [6].

В последние годы в связи с постоянным ростом единичных мощностей энергоблоков АЭС неуклонно повышаются требования к безопасности и надежности оперативно-диспетчерского управления работой электростанций. Так, для АЭС при увеличении мощности энергоблоков с 750 до 1 500 МВт резко возросло число параметров, выводимых на блочный щит управления и контролируемых ЛПР. Число

измеряемых параметров увеличилось в 5 раз, управляющих и регулирующих приводов – в 4 раза, а число различных вариантов реализации принимаемых решений (управляющих воздействий) достигло 2 000. При выполнении одной из главных функций оперативно-диспетчерского управления – удержания энергоблока на мощности – для энергоблока типа ВВЭР мощностью 1 000 МВт в поле зрения ЛПП необходимо держать около 300 параметров, характеризующих функционирование подсистем первого и второго каналов, электрической связи и управления.

Время, отводимое на принятие решения, определяемое длительностью интервала от момента возникновения нарушения в работе оборудования до момента появления необратимых изменений в технологическом процессе, требующих останова энергоблока, существенно сократилось и составляет менее минуты. За это время нужно зафиксировать и идентифицировать отклонение (выявить систему и подсистему, где произошло отклонение, текущее значение отклонившегося параметра или параметров и динамику изменения), определить причину отклонения, принять решение о необходимой коррекции и осуществить корректирующие воздействия. Анализ аварийных ситуаций на объектах атомной энергетики, возникших по вине оперативного персонала за последнее время, показал, что в большинстве случаев причиной аварии явилось принятие ошибочных решений по коррекции из-за неправильного или несвоевременного выявления аномальных отклонений. Поэтому в последнее время все большую роль приобретают исследования по проблематике проектирования ИСППР РВ для тренировки и поддержки оперативно-диспетчерского персонала энергосистем.

Чрезвычайно важной для энергетики является также проблема диагностического контроля технического состояния энергетического оборудования. Правильно организованный диагностический контроль (мониторинг), под которым понимается непрерывный или периодически повторяющийся процесс обработки и анализа данных измерений, направленный на своевременное выявление и устранение возникающих в процессе эксплуатации оборудования дефектов, способствует повышению эффективности функционирования и надежности энергетического оборудования, снижению эксплуатационных расходов на производство электроэнергии.

Как правило, ИСППР РВ используются при оперативном управлении сложными системами и процессами в открытых и динамических предметных / проблемных областях и ориентированы на решение плохо формализуемых, слабоструктурированных задач при отсутствии полной и достоверной информации. Спецификой таких задач является:

- невозможность получения полной и объективной информации, необходимой для решения, и вынужденное использование субъективной экспертной информации;

- комбинаторный характер данных задачи, многие из них относятся к классу NP-полных;

- присутствие недетерминизма в процессе поиска решения;

- потребность в коррекции и введении дополнительной информации непосредственно в процессе поиска решения, активное участие в нем ЛПП;

- необходимость получения решения в условиях достаточно жестких временных ограничений, определяемых реальным управляемым процессом.

Перечисленные факторы не позволяют успешно использовать для решения таких задач строгие алгоритмические методы оптимизации и модели принятия решений. Основой для поиска решения являются эвристические методы, базирующиеся на учете специфики предметной / проблемной области, знаниях и

опыте специалистов-экспертов (ЛПР), решающих подобные задачи в своей производственной деятельности.

Мнемосхема энергоблока АЭС представлена на рис. 2. Основными элементами энергоблока являются:

- GCN – главный циркуляционный насос;
- CO – конденсаторная установка;
- EJ – эжекторная установка;
- GPP – регулятор давления;
- SPP – сепаратор-промперегреватель;
- KN1 – конденсаторный насос первой ступени;
- KN2 – конденсаторный насос второй ступени;
- BRU-K – быстродействующая редуцирующая установка для конденсатора;
- BRU-A – быстродействующая редуцирующая установка для атмосферы;
- PVD – подогреватель высокого давления;
- TPN1, TPN2 – питательные насосы;
- APEN – питательный насос с электроприводом;
- PROD – система продувки;
- KO – компенсатор объема.

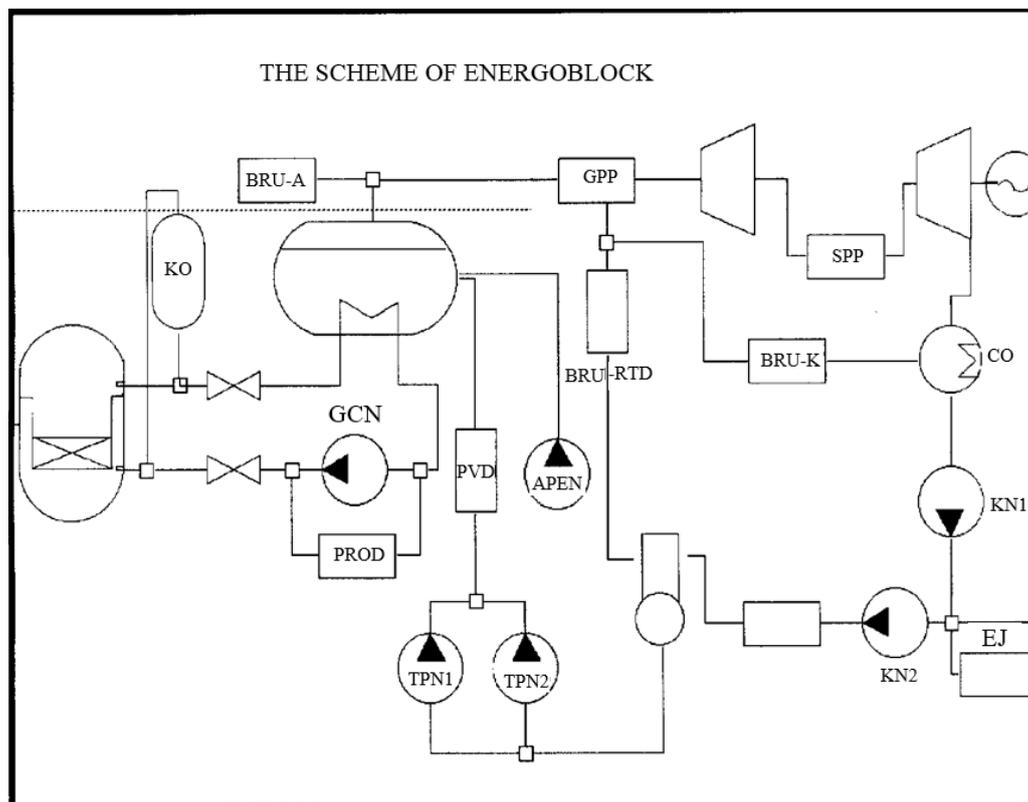


Рис. 2. Мнемосхема энергоблока АЭС

На рис. 3 представлена архитектура прототипа ИСППР РВ для оперативно-диспетчерского управления сложным объектом типа подсистем энергоблока, а на рис. 4, 5 – примеры полиэкранов для ЛПР в реализованных прототипах (для подсистемы конденсаторной установки и подсистемы охлаждения зоны реактора соответственно).

Полиэкранный интерфейс содержит следующие основные области – квадранты:

1) левый верхний (текстовая информация о диагностируемой неисправности и рекомендации по ее устранению; диагноз и рекомендации могут выделяться разным цветом);

2) правый верхний (мнемосхема управляемого объекта (подсистемы), с указанием соответствующих датчиков, причем если показания датчика находятся в заданном интервале, то его цвет зеленый, если за пределами интервала, т.е. в нештатном режиме, – красный);

3) левый нижний (квазидерево, отображающее процесс функционирования системы. Каждая гипертекстовая вершина отображает соответствующую ситуацию, сложившуюся на объекте (ее раскрытие позволяет увидеть значения соответствующих параметров), а ребра – переходы между состояниями. Данная информация предназначена в основном для экспертов, анализирующих причины возникновения нештатных режимов);

4) правый нижний, отображающий в динамике график изменения интересующих ЛПР параметров, как правило тех, которые вышли за допустимые интервалы.

При желании ЛПР нижние квадранты полиэкрана могут содержать элементы когнитивной графики, дающие образное представление сложившейся на объекте ситуации (примеры когнитивных образов для различных состояний подсистем энергоблока АЭС приведены в [6]).

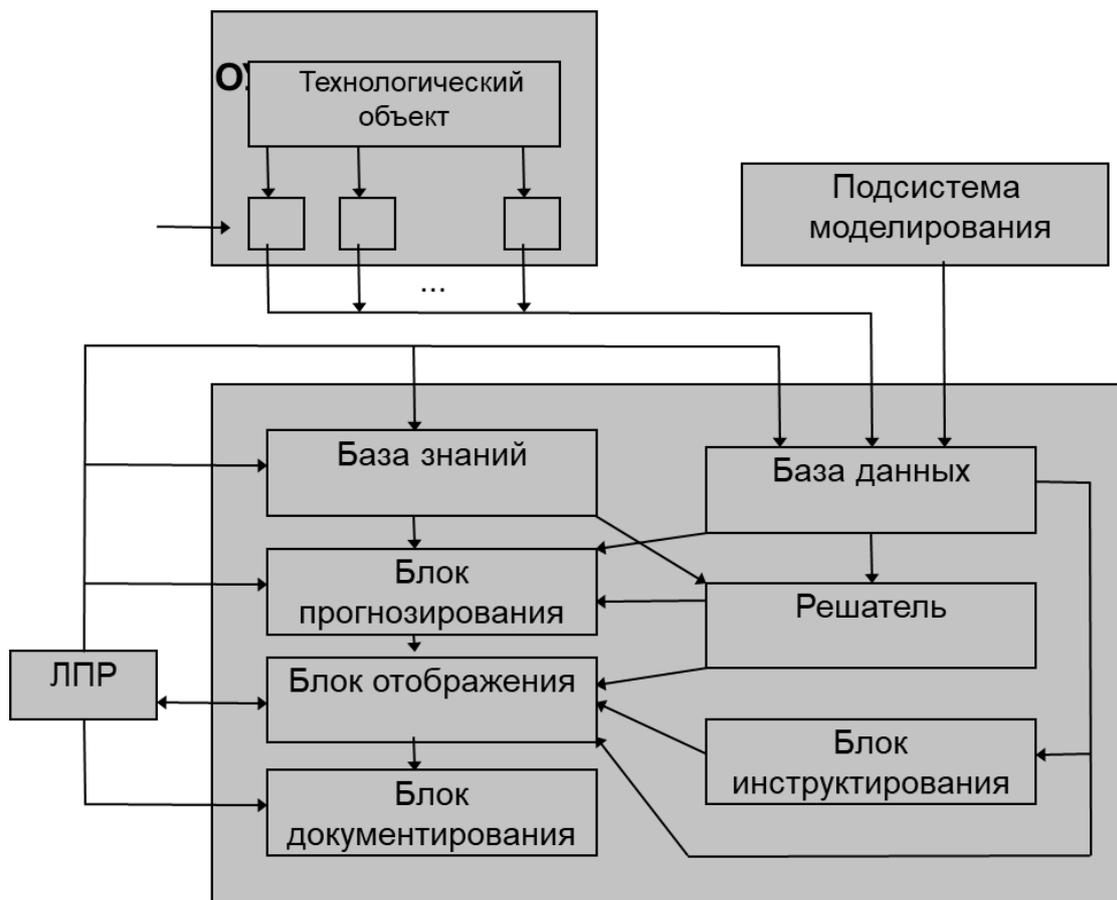


Рис. 3. Архитектура прототипа ИСППР РВ

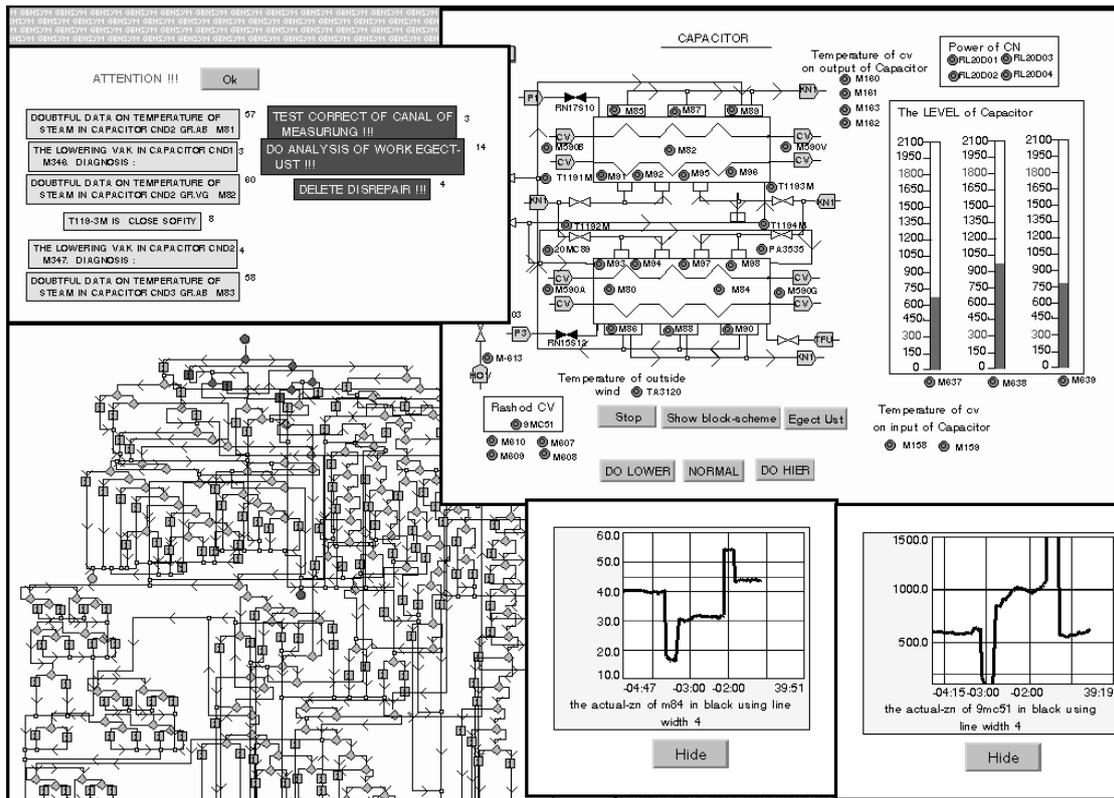


Рис. 4. Пример полиэкрана для ЛПР в прототипе для конденсаторной установки

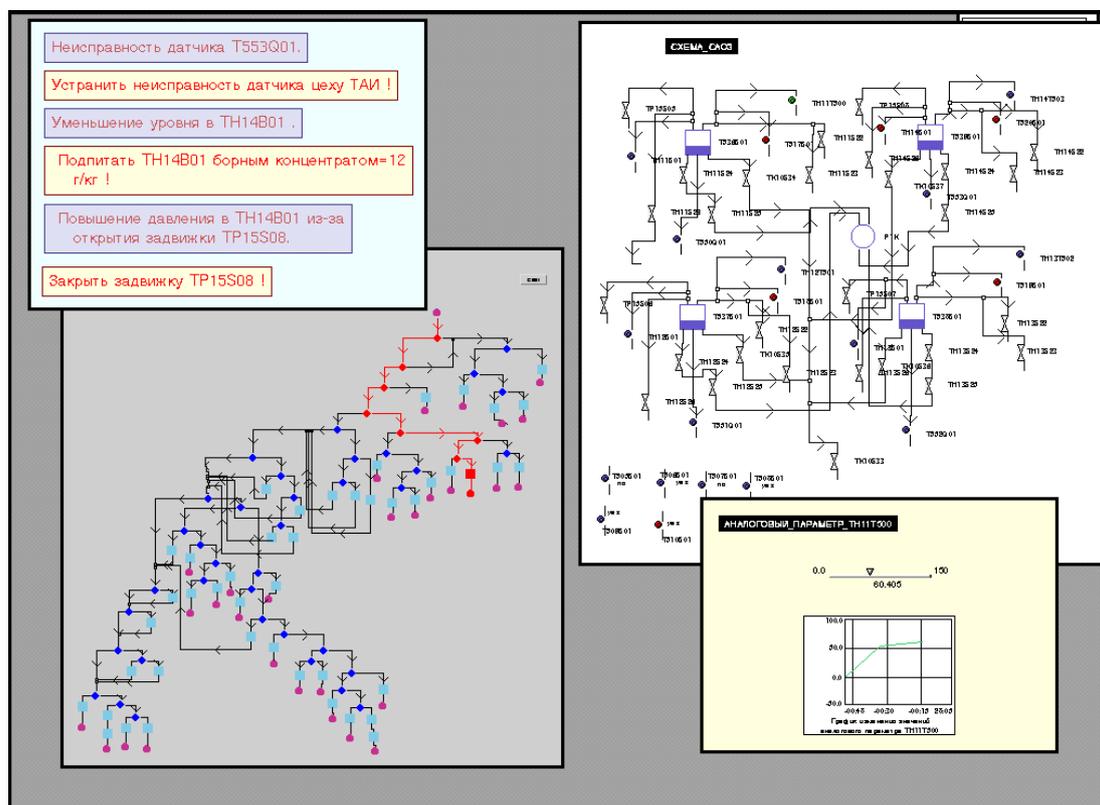


Рис. 5. Пример полиэкрана для ЛПР в прототипе для подсистемы охлаждения зоны реактора

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время на кафедре прикладной математики НИУ «МЭИ» совместно с коллегами из Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники (БГУИР) проводятся исследования и разработки, направленные на реализацию средств машинного обучения (самообучения) в современных ИС и особенно ИС РВ типа ИСППР РВ в плане повышения их адаптационных возможностей к изменениям на объекте и во внешней среде, а также в плане включения средств машинного обучения в инструментальные средства разработки ИС и ИС РВ [8].

ЛИТЕРАТУРА

1. Вагин В.Н., Еремеев А.П. Научная школа искусственного интеллекта в Московском энергетическом институте на базе кафедры прикладной математики: становление и развитие // Вестник МЭИ. 2015. № 2. С. 29–37.
2. Вагин В.Н., Еремеев А.П., Кутепов В.П., Фальк В.Н., Фоминых И.Б. К 40-летию кафедры прикладной математики: исследования и разработки в области обучения, программирования, информационных технологий и искусственного интеллекта // Вестник МЭИ. 2017. № 4. С. 117–128.
3. Вагин В.Н. Дедукция и обобщение в системах принятия решений. М.: Наука; Физматлит. 1988. 384 с.
4. Башлыков А.А., Еремеев А.П. Экспертные системы поддержки принятия решений в энергетике / под. ред. А.Ф. Дьякова. М.: МЭИ. 1994. 216 с.
5. Вагин В.Н., Головина Е.Ю., Загорянская А.А., Фомина М.В. Достоверный и правдоподобный вывод в интеллектуальных системах / под. ред. В.Н. Вагина, Д.А. Поспелова. 2-е изд., испр. и доп. М.: Физматлит. 2008. 712 с.
6. Башлыков А.А., Еремеев А.П. Основы конструирования интеллектуальных систем поддержки принятия решений в атомной энергетике: учебник. М.: ИНФРА-М. 2017. 351 с.
7. Поспелов Д.А. Логико-лингвистические модели в системах управления. М.: Энергоиздат. 1981. 232 с.
8. Golenkov V.V., Gulyakina N.A., Grakova N.V., Nikulenkа V.Y., Eremeev A.P., Tarasov V.B. From training intelligent systems to training their development means. *Proceedings of the International Conference on Open Semantic Technologies for Intelligent Systems (OSTIS-2018)*. Minsk. 2018. V. 2. № 8, pp. 81–99.

METHODS AND PROGRAM TOOLS OF INTELLIGENT DECISION SUPPORT FOR MONITORING AND MANAGING COMPLEX TECHNICAL DEVICES

A.P. EREMEEV, Dr Sci

National Research University "MPEI". 14, Krasnokazarmennaya st., 111250,
Moscow, Russia, e-mail: eremeev@appmat.ru

This article was written on report materials with the similar name on "Zolotovskiy readings" which took place on November 2, 2018 at the Tver state technical university. Here are provided methods, models and software developed at the Department of Applied mathematics of the National research university "Moscow Power Engineering Institute" (NRU "MPEI"). The received results are used for development mathematical and the software of the perspective intelligent decision support systems (IDSS), including their most difficult representatives – IDSS of real time (IDSS RT) intended for the help

operational dispatching personnel during the monitoring and management of difficult technical (technological) objects and systems on the example of power objects. Research and development are conducted within research according to the state and federal programs, grants of the Russian Foundation for Basic Research (including, the RFBR projects No 17-07-00553a, 18-01-00007 Bel-a, 18-01-00201a) and also according to programs NRU "MPEI".

Keywords: artificial intelligence, intelligent system, decision support, real time, software, program tool.

REFERENCES

1. Vagin V.N., Ereemeev A.P. The scientific school of artificial intelligence at the Moscow Power Engineering Institute on the basis of the department of applied mathematics: the formation and development. *Vestnik MEI*. 2015. No 2, pp. 29–37. (In Russian).
2. Vagin V.N., Ereemeev A.P., Kutepov V.P., Fal'k V.N., Fominyh I.B. To the 40th anniversary of the department of applied mathematics: research and development in the field of education, programming, information technology and artificial intelligence. *Vestnik MEI*. 2017, No 4, pp. 117–128. (In Russian).
3. Vagin V.N. Deduktsia i obobshchenie v sistemah prinyatiya resheniy. [Deduction and generalization in decision-making systems]. Moscow: Nauka; Fizmatlit. 1988. 384 p.
4. Bashlykov A.A., Ereemeev A.P. Ekspertnye sistemy podderzhki prinyatiya resheniy v energetike / Pod red. A.F. D'yakova. [Expert decision support systems in the energy sector / Under ed. A.F. Dyakova]. Moscow: MEI, 1994. 216 p.
5. Vagin V.N., Golovina E.Yu., Zagorynskaya A.A., Fomina M.V. Dostoverniy i pravdopodobniy vyvod v intellektual'nyh sistemah / pod. red. V.N. Vagina, D.A. Pospelova. [Exact and plausible reasoning in intelligent systems / under ed. V.N. Vagin, D.A. Pospelov]. Moscow: FIZMATLIT, 2008. 712 p.
6. Bashlykov A.A., Ereemeev A.P. Osnovy konstruirovaniya intellektual'nyh sistem podderzhki prinyatiya resheniy v energetike. [Fundamentals of designing intelligent decision support systems in nuclear energy: a textbook]. Moscow: INFRA-M, 2017. 351 p.
7. Pospelov D.F. Logiko-lingvisticheskie modeli v sistemah upravleniya. [Logical and linguistic models in control systems]. Moscow: Energoizdat, 1981. 232 p.
8. Golenkov V.V., Gulyakina N.A., Grakova N.V., Nikulenkа V.Y., Ereemeev A.P., Tarasov V.B. From training intelligent systems to training their development means. *Proceedings of the International Conference on Open Semantic Technologies for Intelligent Systems (OSTIS-2018)*. Minsk, V. 2, No 8, 2018, pp. 81–99.

ОСОБЕННОСТИ ОРГАНИЗАЦИИ ХРАНИЛИЩА ДАННЫХ НА ОСНОВЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛИЗАЦИИ ПОИСКОВОГО АГЕНТА И ЭВОЛЮЦИОННОЙ МОДЕЛИ ОТБОРА ЦЕЛЕВОЙ ИНФОРМАЦИИ

В.К. ИВАНОВ, канд. техн. наук

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

В статье представлен систематизированный обзор результатов разработки теоретической основы и пилотной реализации технологии хранилища данных с автоматическим пополнением данными из источников, относящихся к различным тематическим сегментам. Предполагается, что хранилище будет содержать информацию об объектах, обладающих значительным инновационным потенциалом. Механизм селекции такой информации основан на определении ее семантической релевантности генерируемым поисковым запросам. При этом дается количественная оценка инновационности объектов, в частности их технологической новизны и востребованности. Приведено описание принятых показателей инновационности, рассмотрены вопросы применения теории свидетельств для обработки неполной и нечеткой информации. Определены основные идеи методики обработки результатов измерений для расчета вероятностных значений компонентов инновационности, кратко описано применение эволюционного подхода при формировании лингвистической модели архетипа объекта. Приведены сведения об экспериментальной проверке адекватности разработанной вычислительной модели. Результаты исследований, описанные в статье, могут быть использованы для бизнес-планирования, прогнозирования технологического развития, информационного обеспечения экспертизы инвестиционных проектов.

Ключевые слова: хранилище данных, интеллектуальный агент, тематический поиск, генетический алгоритм, база данных, свидетельство, бизнес-планирование, инновационность, новизна, востребованность.

ВВЕДЕНИЕ

В статье впервые представлен систематизированный обзор результатов работ, выполняемых в рамках проекта «Организация и поддержка хранилища данных на основе интеллектуализации поискового агента и эволюционной модели отбора целевой информации». Целью проекта является разработка теоретической основы и пилотной реализации технологии хранилища данных с автоматическим пополнением данными из источников, относящихся к различным тематическим сегментам. Предполагается, что хранилище будет содержать технические, экономические, социальные и другие характеристики объектов, обладающих значительным инновационным потенциалом.

Механизм селекции информации об инновационных объектах основан на определении семантической релевантности такой информации генерируемым поисковым запросам. При этом алгоритмы определения релевантности должны в значительной степени учитывать инновационную составляющую. Основное внимание в проведенных исследовательских работах было уделено разработке соответствующей вычислительной модели. Предлагаемые решения дают количественную оценку

инновационности объектов, что в определенной степени является новым подходом.

Актуальность оценки инновационности продуктов очевидна. С экономической точки зрения на микроэкономическом уровне инновации являются ключевым фактором конкурентоспособности любого современного предприятия, как на конкурентных, так и на монопольных рынках. На макроэкономическом уровне активность диффузии инноваций определяет темпы экономического роста, а имплементируемость инноваций способствует концентрации капитала в самых коммерчески эффективных видах предпринимательской деятельности.

Предполагается, что результаты проекта дадут возможность решения следующих прикладных задач:

определение характеристик новых областей и направлений при бизнес-планировании;

прогнозирование технологического развития предприятия, оценка возможностей производства высокотехнологичной продукции;

информационное обеспечение работы экспертных советов, групп, отдельных экспертов.

ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЕ ЗАДАЧИ ПРОЕКТА

Основной акцент в исследовательских работах делался на разработке такой вычислительной модели эволюционного процесса генерации запросов и фильтрации результатов поиска, которая будет:

учитывать критерий инновационности объектов, информацию о которых планируется разместить в создаваемом хранилище;

давать количественную оценку релевантности информации о таких объектах;

использовать соответствующие улучшения поискового паттерна.

На первом этапе были сформулированы следующие задачи:

1. Моделирование эволюционного процесса генерации запросов и фильтрации результатов поиска, определение возможностей и условий применения улучшений поискового паттерна.

2. Исследование эффективности предлагаемых решений на тестовых коллекциях (базах данных): экспериментальная проверка адекватности разработанных моделей, обоснование, уточнение и формализация критериев эффективности поискового агента.

ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Сформулирован понятийный базис и предложена лингвистическая модель архетипа искомого объекта, образующая поисковый паттерн. Предложены формальные выражения для вычисления значений индикаторов инновационности объектов хранилища: технологической новизны и востребованности потребителями. Введено понятие архетипа объекта, обладающего свойствами, значимыми и общими для всех представителей этого архетипа. Введение понятия архетипа объекта позволяет выполнить формализацию его лингвистической модели, вводя ограничения на эталонную информационную модель в заданной предметной области.

2. Введены нечеткие показатели вероятности того, что объект обладает заданными свойствами инновационности. Для вычисления соответствующих показателей обосновывается применение теории Демпстера – Шафера. Подготовлен детальный обзор публикаций по современным направлениям развития теории Демпстера – Шафера и ее приложений. Проведены исследования применимости теории

свидетельств для организации взаимодействия интеллектуальных поисковых агентов в гетерогенной информационно-поисковой системе.

3. Разработан начальный вариант методики обработки результатов измерений исходных показателей для расчета вероятностных значений компонентов инновационности объектов.

4. Обоснован и применен эволюционный подход к решению задачи формирования лингвистической модели архетипа объекта и получения эффективного мультимножества поисковых запросов.

5. Предложены варианты методики, предусматривающие обработку результатов измерений, полученных из нескольких источников с представительными базами данных с учетом надежности источника. Разработан алгоритм групповой обработки результатов измерений уровня инновационности объекта.

6. Выполнена экспериментальная проверка адекватности разработанной вычислительной модели. Проведенные эксперименты подтвердили обоснованность применения методов теории свидетельств для обработки результатов измерений показателей инновационности.

7. Проведен анализ показателей инновационности за двадцатилетний период для некоторых объектов. Результаты подтверждают гипотезу о динамике изменений новизны и востребованности архетипа объекта. Подтверждены известные циклические закономерности в соотношениях инноваций и экономического роста.

Результаты исследований неоднократно докладывались на международных и российских научных конференциях, таких как INFORINO-2018, ПТГ'18, КИИ-2018 и др. Список работ, опубликованных по результатам проекта, можно посмотреть по адресу <http://elib.tstu.tver.ru/MegaPro/GetDoc/WebDocs/45>. Ниже некоторые важные аспекты выполненных исследований раскрываются более подробно.

ПОКАЗАТЕЛИ ИННОВАЦИОННОСТИ ОБЪЕКТОВ

Нами введены понятия технологической новизны, востребованности и имплементируемости как составных частей критерия инновационности искомого объекта. Под *технологической новизной* понимаются значительные улучшения, новый способ использования или предоставления объекта (субъектами новизны являются потенциальные пользователи или сам производитель). *Востребованность* – это осознанная потенциальным производителем необходимость для него объекта, оформленная в спрос. *Имплементируемость* определяет технологическую обоснованность, физическую осуществимость и способность объекта быть интегрированным в систему для получения желаемых эффектов.

Предложена также лингвистическая модель архетипа искомого объекта, образующая поисковый паттерн. Термы модели классифицируются как ключевые свойства, описывающие структуру объекта, условия применения или результаты функционирования. Область определения архетипа отмечается маркером. Поисковые запросы конструируются как комбинации термов и маркера; при значительном количестве термов используется генетический алгоритм генерации запросов и фильтрации результатов – оригинальная разработка участников проекта, позволяющая получить квазиоптимальный набор поисковых запросов. Предложены следующие формальные выражения для вычисления значений индикаторов инновационности:

$$Nov = 1 - \frac{1}{S} \sum_{k=1}^S \left[1 - \exp\left(1 - \frac{R_k}{R_0^{01}}\right) \right],$$

где Nov – новизна объекта; R_k – число документов, найденных в результате выполнения k -го запроса в базе данных, содержащей информацию о рассматриваемой предметной области; R_0^{01} – нормированное на диапазон $[0; 1]$ число документов, найденных в результате выполнения запроса, состоящего из одного термина-маркера;

$$Rel = \frac{1}{S} \sum_{k=1}^S \left[1 - \exp\left(1 - \frac{F_k}{F_0^{01}}\right) \right],$$

где Rel – востребованность объекта; F_k – частота выполнения пользователями запросов, аналогичных k -му запросу; F_0^{01} – нормированное на диапазон $[0; 1]$ значение частоты выполнения пользователями запроса, состоящего из одного термина-маркера.

Используется гипотеза об адекватности отображения в информационном пространстве реальных процессов при условии достаточного количества свидетельств о них из разных источников. Оценка новизны объекта основывается на нормализованной интегральной оценке количества результатов поиска информации об объекте в гетерогенных базах данных. Предполагается, что для новых объектов количество результатов поиска, релевантных поисковому паттерну, будет меньше, чем для давно существующих и известных объектов. Оценка востребованности объекта основывается на нормализованной интегральной оценке частоты выполнения пользователями запросов, аналогичных запросам, генерированным из поискового паттерна. Оригинальность решения заключается в согласованном получении и использовании информации об объектах хранилища из многих гетерогенных источников, включая информационные интернет-ресурсы. Учитывая непосредственную количественную оценку инновационности, мы считаем этот подход дополняющим традиционные [1, 2].

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕОРИИ СВИДЕТЕЛЬСТВ

В связи с тем, что ожидается очевидная неполнота и неточность информации об объектах, полученной из различных источников, в проекте вводятся нечеткие показатели вероятности того, что объект обладает технологической новизной, и вероятности того, что объект востребован. Для вычисления указанных вероятностей обосновано применение теории свидетельств Демпстера – Шафера [3, 4]. Так, принимается, что базовая вероятность m попадания результатов измерения показателя инновационности объекта (Nov или Rel) в интервал значений A определяется следующим образом:

$$m: P(\Omega) \rightarrow [0; 1], m(\emptyset) = 0, \sum_{A \in P(\Omega)} m(A) = 1,$$

где Ω – множество значений результатов измерения показателя; $P(\Omega)$ – множество всех подмножеств Ω . Для заданных k интервалов рассчитываются функция доверия $Bel(A) = \sum_{A_k: A_k \subseteq A} m(A_k)$ и функция правдоподобия $Pl(A) = \sum_{A_k: A_k \cap A \neq \emptyset} m(A_k)$, которые определяют верхнюю и нижнюю границы вероятности обладания объектом заданным свойством. Таким образом дается оценка значений показателей Nov или Rel в условиях неполноты и неточности информации об объектах. Соответствующие специализированные алгоритмы являются новой областью применения теории свидетельств.

В рамках проекта были проведены исследования применимости теории свидетельств для решения задач диагностики сложных технических систем и оптимального управления эволюцией многостадийных процессов в нечеткой динамической среде [5]. Цель этих исследований – предложить новую архитектуру для взаимодействия интеллектуальных поисковых агентов в гетерогенной информационно-поисковой системе, основанную на понятии «аномальности» агента. Аномальное состояние (АС) поискового агента интерпретируется как наличие претендента на инновацию в результатах поиска этого агента и диагностируется как выход индикаторов инновационности объекта за характеристические значения.

Для индикации АС поискового агента $s \in S$ используется следующее необходимое и достаточное условие: $(\forall s \in S)(F = 0) \leftrightarrow P^* \neq 0$, где F – индикаторная функция; P^* – множество зарегистрированных АС. Учитывая потенциально большое количество источников информации, при проверке диагностических гипотез необходимо не пропустить действительную инновацию и избежать индикации ложной инновации. Индикаторная функция дает нам возможность количественного определения «рациональности» и «полезности» поискового агента в заданном контексте.

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ИННОВАЦИОННОСТИ ОБЪЕКТОВ

Разработан начальный вариант методики обработки результатов измерений исходных показателей для расчета вероятностных значений компонентов инновационности объектов: числа релевантных документов и частот выполнения запросов пользователями релевантных запросов.

Основные шаги методики:

1. Выполнение заданного количества квазиоптимальных поисковых запросов, сгенерированных с помощью генетического алгоритма из поискового паттерна. С точки зрения теории свидетельств эти запросы являются наблюдаемыми подмножествами или фокальными элементами.

2. Определение базовой вероятности появления признаков инновационности для каждого из наблюдаемых подмножеств.

3. Вычисление функций доверия и правдоподобия для заданного количества интервалов группирования, соответствующих номинальной шкале полного или частичного наличия / отсутствия признаков инновационности.

Варианты методики предусматривают обработку результатов измерений, полученных из нескольких источников (поисковых систем) с учетом коэффициента дисконтирования для базовой вероятности. В качестве источников результатов измерений выступают гетерогенные поисковые системы, имеющие представительные базы данных. Использовалась классическая модель комбинирования различных свидетельств, основанная на правиле Демпстера. По имеющимся результатам измерений рассчитывается коэффициент конфликтности, который используется при вычислении комбинированной базовой вероятности появления признаков инновационности для искомого объекта. Методика не имеет аналогов и обладает потенциалом для применения других моделей комбинирования свидетельств.

Предложен также собственный алгоритм групповой обработки результатов измерений уровня инновационности объекта. Алгоритм предусматривает операции сбора исходных данных, ввод данных по категориям, расчет базовых вероятностей свидетельств, комбинирование свидетельств по компонентам объекта и показателям, определение значения функций доверия и правдоподобия комбинированных свидетельств, формирование интегральных оценок по компонентам объекта и / или показателям.

Комбинирование выполняется рекурсивно по парам источников: из двух источников свидетельств образуется один условный источник, свидетельства которого комбинируются со следующим фактическим источником. Разработанный алгоритм реализован в виде веб-приложения с графическим интерфейсом пользователя. Мы предполагаем внедрение этого приложения в различные сферы инженерной деятельности, где возможно применение апостериорных источников информации, таких как электронные датчики или цифровые измерительные устройства. Другим направлением развития является поддержка математических методов, альтернативных теории свидетельств.

ЭВОЛЮЦИОННЫЙ ПОДХОД К ФОРМИРОВАНИЮ ЛИНГВИСТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ОБЪЕКТА

В проекте обоснован и применен эволюционный подход к решению задачи формирования лингвистической модели архетипа объекта. Основная идея состоит в том, чтобы организовать с помощью специального генетического алгоритма (ГА) эволюционный процесс, генерирующий стабильную и эффективную совокупность поисковых запросов для получения наиболее релевантных результатов. Начальная популяция из поисковых запросов представлена в виде множества векторов, каждый из которых есть набор ключевых термов. При протекании процесса закодированные запросы последовательно подвергаются генетическим изменениям (скрещиванию и мутациям) и выполняются в поисковой системе. Затем оценивается семантическая релевантность промежуточных результатов поиска, вычисляются значения фитнес-функции и выбираются наиболее подходящие запросы. В результате эволюционного процесса получаем мультимножество эффективных запросов, которое интерпретируется как лингвистическая модель целевого объекта. Оригинальной особенностью предлагаемого эволюционного подхода, подробно описанного в [6], является способ вычисления значений фитнес-функции и интерпретации генетических операций.

В понимании работы ГА важную роль играет фундаментальная теорема схем Холланда. Она сформулирована применительно к каноническому ГА и доказывает его способность генерировать достаточное количество эффективных схем особей для достижения окрестностей оптимума фитнес-функции за конечное число шагов. Очевидна целесообразность проверки на выполнение теоремы Холланда любых модификаций канонического ГА, созданных для решения конкретной задачи. В наших исследованиях определены условия корректной проверки выполнения теоремы Холланда, в частности требования к кодированию генотипа. Предложен новый метод кодирования генотипа, который использует расстояние между векторами. Выявлены актуальные направления доработки программного обеспечения ГА, а именно создание алгоритмов расчета весовых коэффициентов для компонентов фитнес-функции и техника синонимизации ключевых термов.

В части проведения опытно-конструкторских работ было выполнено тестирование программного интерфейса для массовой индексации документов различных форматов, размещаемых в хранилище, в среде серверного программного обеспечения Apache Lucene Solr (<http://lucene.apache.org>), а также DocFethcher (локальной имплементации индексатора Lucene).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для экспериментальной проверки адекватности разработанной вычислительной модели были сформулированы следующие задачи:

1. Апробация методики расчета показателей инновационности объектов в соответствии с принятой вычислительной моделью.

2. Сравнение рассчитанных результатов показателей инновационности с их экспертными оценками.

3. Сравнение рассчитанных результатов показателей инновационности, полученных после обработки данных из разных поисковых систем.

4. Оценка динамики изменений показателей инновационности объекта во времени.

5. Получение обоснования пригодности измеренных значений индикаторов инновационности для дальнейшей обработки.

В качестве источников информации об объектах были отобраны следующие базы данных: <http://new.fips.ru>, <https://elibrary.ru>, <https://rosrid.ru>, <https://yandex.ru>, <https://wordstat.yandex.ru>, <https://google.com>, <https://adwords.google.com>, <https://patents.google.com>, <https://scholar.google.ru>. Объектами для проведения анализа стали десять лучших изобретений 2017 года, выбранные экспертами Роспатента, и десять случайно выбранных изобретений, зарегистрированных в том же году. Поисковые паттерны готовились экспертами. Корпуса документов для анализа формировались в поисковых системах указанных выше баз данных.

Проведенные эксперименты подтвердили обоснованность применения методов теории свидетельств для обработки результатов измерений показателей инновационности. Несмотря на то, что абсолютные значения измерений ожидаемо различаются для разных источников данных, разработанная модель адекватно оценивает относительные изменения значений показателей новизны и востребованности объекта (для комбинированных значений показателей прогнозируются аналогичные результаты). Средние значения новизны патентов, лучших по оценке экспертов, превышают средние значения новизны случайно выбранных патентов. Аналогично, средние значения востребованности лучших объектов превышают средние значения востребованности случайно выбранных объектов. Таким образом, вычислительная модель подтверждает экспертную оценку инновационности.

В ходе проведения экспериментов был выполнен анализ новизны объектов, оцененной за определенный (двадцатилетний) период. На рис. 1 и 2 в качестве примера представлены графики изменения новизны и востребованности архетипа потенциально инновационного объекта «Электронный индикатор уровня». Аппроксимация полученных значений (сплошные линии тренда на графиках) подтверждает гипотезу об уменьшении новизны объекта во времени. Значение востребованности объекта со временем возрастает. Очевидно, что за время своего существования объект приобретает все большую популярность среди пользователей, поэтому потенциальный интерес к нему растет. Следует отметить, что значения показателей инновационности во времени фактически рассчитывались не для какого-либо конкретного объекта (например, патента), а для его архетипа, заданного лингвистической моделью патента.

В результатах экспериментов нашли подтверждение известные циклические закономерности, выявленные при анализе соотношений инноваций и экономического роста. Динамика показателей инновационности на достаточно большом интервале имеет циклический характер (пунктирные линии тренда на графиках). Более того, мы видим корреляцию между значениями новизны и востребованности архетипа объекта. Хотя результаты вычислений в целом неоднозначны, мы идентифицируем циклическую, которая требует проверки гипотезы инновационных циклов в конкретной области применения.

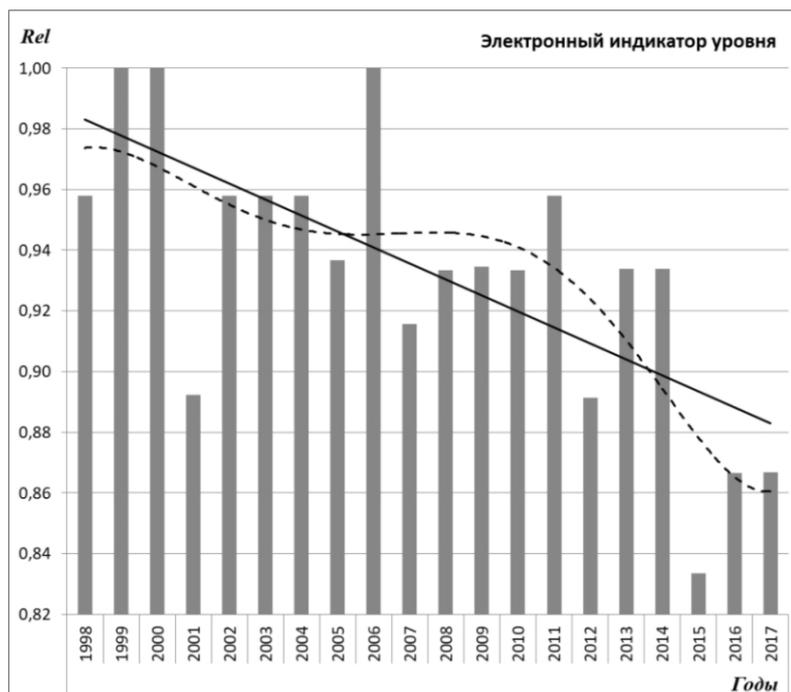


Рис. 1. Изменение показателя инновационности объекта «Технологическая новизна» (пример)



Рис. 2. Изменение показателя инновационности объекта «Востребованность» (пример)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Очевидно, что цели обсуждаемого в статье проекта соответствуют приоритетному направлению развития критических технологий информационных, управляющих, навигационных систем. Текущие и планируемые результаты, по нашему мнению, могут способствовать переходу к передовым цифровым, интеллектуальным производственным технологиям, роботизированным системам, созданию систем обработки больших объемов данных.

На следующем этапе выполнения проекта планируется получить:
формальное описание лингвистической модели архетипа объекта, учитывающее особенности поискового паттерна, ориентированного на инновационность искомым объектов;

результаты экспериментов, подтверждающих гипотезу о применимости поискового паттерна для объектов, имеющих инновационный потенциал;

архитектуру и модель поведения поискового интеллектуального агента, работающего с источником данных в системе гетерогенных баз данных;

прототип программного обеспечения многоагентной поисковой системы, обеспечивающей совместную обработку результатов измерений показателей инновационности искомым объектов.

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор выражает глубокую признательность своим коллегам – участникам проекта, помогавшим подготовить настоящую статью: Н.В. Виноградовой, А.Г. Глебовой, А.А. Гусарову, Е.Н. Кабановой, П.И. Мескину, И.В. Образцову, Б.В. Палюху, А.Н. Сотникову.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 18-07-00358 А).

ЛИТЕРАТУРА

1. Tucker R.B. Driving growth through innovation: how leading firms are transforming their futures. 2nd ed. Berrett-Koehler Publishers, San Francisco, 2008. 224 p.

2. Oslo Manual: Guidelines for Collecting and Interpreting Innovation Data. *The Measurement of Scientific and Technological Activities, 3rd Edition*, 2005. URL: <https://www.oecd-ilibrary.org/science-and-technology/oslo-manual/9789264013100-en>

3. Shafer G. A Mathematical Theory of Evidence. Princeton, N.J.: Princeton University Press, 1976.

4. Yager R., Liping Liu. Classic Works of the Dempster-Shafer Theory of Belief Functions. *London: Springer*, 2010

5. Палюх Б.В., Ветров А.Н., Егерова И.А. Архитектура интеллектуальной системы оптимального управления эволюцией многостадийных процессов в нечеткой динамической среде // *Программные продукты и системы*. 2017. № 4. С. 619–624.

6. Ivanov V.K., Palyukh B.V., Sotnikov A.N. Efficiency of genetic algorithm for subject search queries // *Lobachevskii Journal of Mathematics*. 2016. V. 37, № 3, pp. 244–254. DOI: <http://dx.doi.org/10.1134/S1995080216030124>.

PECULIARITIES OF ORGANIZATION OF DATA STORAGE BASED ON INTELLIGENT SEARCH AGENT AND EVOLUTIONARY MODEL SELECTION THE TARGET INFORMATION

V.K. IVANOV, Cand Sci

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

The article presents a systematic review of the results of the development of the theoretical basis and the pilot implementation of data storage technology with automatic replenishment of data from sources belonging to different thematic segments. It is expected that

the repository will contain information about objects with significant innovative potential. The mechanism of selection of such information is based on the determination of its semantic relevance to the generated search queries. At the same time, a quantitative assessment of the innovation of objects, in particular their technological novelty and demand is given. The article describes the accepted indicators of innovation, discusses the application of the theory of evidence for the processing of incomplete and fuzzy information, identifies the main ideas of the method of processing the results of measurements for the calculation of the probabilistic value of the components of innovation, briefly describes the application of the evolutionary approach in the formation of the linguistic model of the archetype of the object, provides information about the experimental verification of the adequacy of the developed computational model. The research results that are described in the article can be used for business planning, forecasting of technological development, information support of investment projects expertise.

Keywords: data warehouse, intelligent agent, thematic search, genetic algorithm, database, evidence, business planning, innovation, novelty, demand.

ACKNOWLEDGMENTS

The author expresses deep gratitude to colleagues – project participants who help to prepare this article: N.V. Vinogradova, A.G. Glebova, A.A. Gusarov, E.N. Kabanova, P.I. Meskin, I.V. Obraztsov, B.V. Paluh, A.N. Sotnikov.

This work was financially supported by the Russian Foundation for Basic Research, project № 18-07-00358 A.

REFERENCES

1. Tucker R.B. Driving growth through innovation: how leading firms are transforming their futures. *2nd ed. Berrett-Koehler Publishers*, San Francisco, 2008.
2. Oslo Manual: Guidelines for Collecting and Interpreting Innovation Data. *The Measurement of Scientific and Technological Activities, 3rd Edition*, 2005. <https://www.oecd-ilibrary.org/science-and-technology/oslo-manual/9789264013100-en>
3. Shafer G. A Mathematical Theory of Evidence. Princeton, *N.J.: Princeton University Press*, 1976.
4. Yager R., Liping Liu. Classic Works of the Dempster-Shafer Theory of Belief Functions, *London: Springer*, 2010
5. Palyukh B.V., Vetrov A.N., Egereva I.A. Architecture of an intelligent optimal control system for multi-stage processes evolution in a fuzzy dynamic environment. *Programmnyye produkty i sistemy*. 2017. No 4, pp. 619–624. (In Russian).
6. Ivanov V.K., Palyukh B.V., Sotnikov A.N. Efficiency of genetic algorithm for subject search queries. *Lobachevskii Journal of Mathematics*, 2016, V. 37, No 3, pp. 244–254. DOI: <http://dx.doi.org/10.1134/S1995080216030124>.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭФФЕКТА ИЗМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ ПОРОШКА АКТИВИРОВАННОГО УГЛЯ В АНАЛИТИЧЕСКОЙ ТЕХНИКЕ

Л.В. ИЛЯСОВ, д-р техн. наук

Тверской государственной технической университет, 170026, Тверь,
наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: lvi450714@mail.ru

Приводятся результаты исследований обнаруженного эффекта изменения электропроводности порошка активированного угля при сорбции газов и возможности его использования в аналитической технике. В экспериментальных исследованиях использовалась специальная ячейка, заполненная порошком активированного угля, содержащая корпус из изоляционного материала и металлический дисковый электрод, служивший дном ячейки. Вторым электродом служил стержень, расположенный по диаметру ячейки. Для измерений электрического сопротивления ячейки использовался неуравновешенный электрический мост. Измерения проводились последовательно на постоянном и переменном токе. При этом было установлено, что как активное, так и комплексное электрическое сопротивление ячейки при сорбции метана и диоксида углерода уменьшается на 4...5 %, а при сорбции пропана – на 15...17 %. Напротив, при сорбции гелия и водорода сопротивление ячейки возрастает на 1...1,5 %. На основе обнаруженного эффекта создан дифференциальный детектор газов с двумя угольными ячейками и продемонстрирована возможность его использования для анализа состава бинарных газовых смесей. Обоснована необходимость проведения дальнейших исследований данного эффекта с целью выявления его физических закономерностей, математического описания и определения информационных возможностей.

Ключевые слова: управление технологическими процессами, электропроводность, активированный уголь, сорбция, газы, постоянный и переменный ток, анализ состава.

ВВЕДЕНИЕ

Развитие технологий нефтеперерабатывающей, нефтехимической, химической и других отраслях промышленности требует совершенствования известных и создания новых средств контроля качества сырья и продукции этих отраслей промышленности. В настоящее время совершенствование контроля качества основывается во многом на расширении спектра физических эффектов, используемых для получения измерительной информации.

На кафедре автоматизации технологических процессов систематически проводятся исследования, направленные на создание новых средств автоматического и лабораторного контроля газовых сред. Одним из направлений, интенсивно развиваемых на протяжении последних пяти лет, явились исследования и разработки акустопарных газоанализаторов и детекторов газов. Был создан ряд акустопарных датчиков малых давлений, анализаторов плотности, вязкости и состава газовых сред, построенных на базе миниатюрных электретных микрофонов и электромагнитных телефонов [1].

Параллельно выполнялись исследования, направленные на выявление возможности создания акустопарных газоанализаторов на базе угольного микрофона и электромагнитного телефона. Было установлено, что при наполнении угольного

микрофона порошком активированного угля при подаче в камеру микрофона различных газов его сопротивление заметно изменяется. В связи с этим было признано целесообразным проведение предварительных исследований обнаруженного эффекта изменения электропроводности порошка активированного угля при сорбции газов.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ научно-технической и патентной литературы, посвященной электропроводности активированных углей, позволил установить, что в настоящее время имеются весьма скромные сведения об электропроводности бурых и каменных углей, а также антрацита [2, 3]. В то же время отсутствуют сведения об электропроводности активированных углей и ее изменении при сорбции газов.

Первоначально эти исследования выполнялись путем измерений электрического сопротивления ячеек различных конструкций, заполненных порошком активированного угля, на постоянном токе. Схема одной из ячеек, конструкция которой обеспечивает надежное уплотнение порошка активированного угля без его механического разрушения, показана на рис. 1.

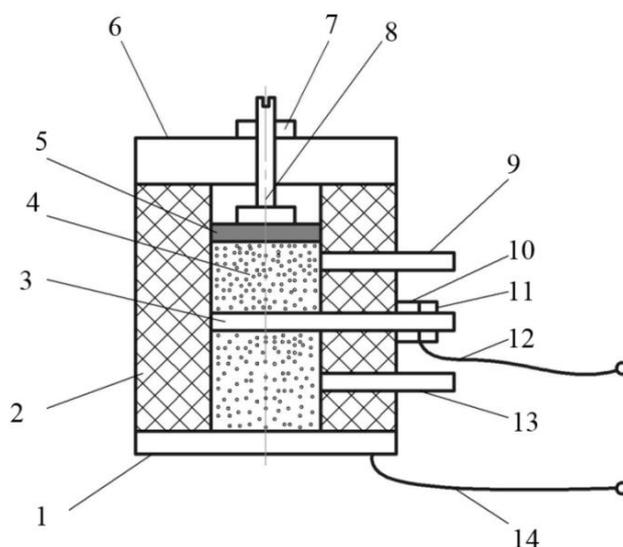


Рис. 1. Схема ячейки для исследования электропроводности порошка активированного угля: 1 – металлическая пластина; 2 – корпус из текстолита; 3 – электрод; 4 – порошок активированного угля; 5 – резиновая прокладка; 6 – крышка из текстолита; 7 – фиксирующая гайка; 8 – нажимной винт; 9 и 13 – штуцеры; 10 и 11 – гайки; 12 и 14 – проводники

Ячейка содержала корпус с цилиндрическим отверстием, изготовленный из текстолита и снабженный текстолитовой крышкой, а также металлическую пластину, служащую одним из электродов ячейки. Вторым электродом ячейки служил металлический винт, который установлен по диаметру цилиндрического отверстия ячейки. Внутренняя полость ячейки, т.е. ее камера, заполнялась порошком активированного угля с эффективным диаметром гранул, равным 0,25...0,45 мм. Для уплотнения порошка активированного угля в ячейке использовали нажимной винт и резиновую прокладку. Положение нажимного винта определялось фиксирующей гайкой. Ячейка была снабжена штуцерами для входа и выхода анализируемого газа. Она подключалась к средству измерений сопротивления при помощи двух проводников, соединенных с электродами ячейки.

Первые опыты проводились путем измерений электрического сопротивления ячейки при использовании цифрового комбинированного прибора типа Щ300. Перед подачей в камеру ячейки одного из газов она промывалась воздухом. При этом было установлено, что при адсорбции метана, пропана и диоксида углерода сопротивление ячейки уменьшается, т.е. ее электропроводность увеличивается, причем наибольшее уменьшение сопротивления наблюдалось при сорбции пропана. Напротив, при сорбции гелия и водорода наблюдалось увеличение сопротивления ячейки. Причем это увеличение по значению оказалось во много раз меньше, чем уменьшение сопротивления ячейки при сорбции метана, пропана и диоксида углерода.

В описанных опытах наблюдался заметный дрейф сопротивления ячейки при периодической подаче воздуха, что может быть обусловлено, например, поляризацией электродов постоянным током, поступающим из измерительной схемы цифрового прибора Щ300. В связи с этим было признано целесообразным продолжить исследование ячейки на переменном токе. Для этих исследований была создана установка, схема которой показана на рис. 2.

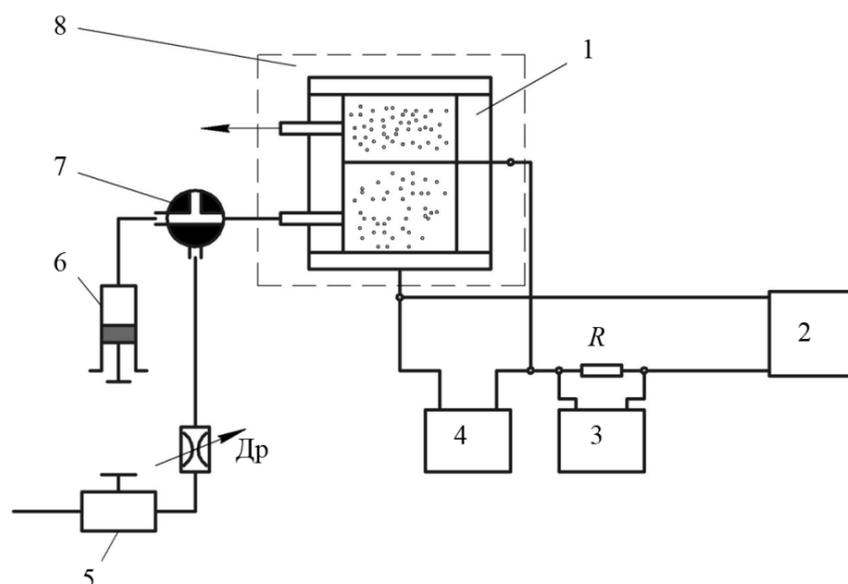


Рис. 2. Схема установки для измерения сопротивления угольной ячейки:
 1 – угольная ячейка; 2 – источник электропитания; 3 и 4 – вольтметры;
 5 – стабилизатор давления газа; 6 – шприц; 7 – трехходовой кран; 8 – термостат;
 Др – переменный пневматический дроссель

Установка содержала ячейку (угольную ячейку), размещенную в термостате, трехходовой кран, обеспечивающий подачу в ячейку азота или какого-либо газа, и измерительную схему. Последняя представляла собой делитель напряжения, составленный из угольной ячейки, постоянного резистора R ($R = 2,7$ кОм) и стабилизированного источника питания, в качестве которого выступал генератор низкой частоты типа ГЗ-118. В этих опытах с помощью мультиметров типа Defort DMM-1000 N измерялись падения напряжения на угольной ячейке и постоянном резисторе. Подача азота осуществлялась из баллона (на рис. 2 не показан) через стабилизатор давления и переменный дроссель, а подача газов после их отбора из емкостей для хранения выполнялась шприцем. Наличие термостата обеспечивало возможность проведения исследований при температурах 20...60°C.

Поскольку описанная выше ячейка представляет собой конденсатор, между электродами которого размещен порошок активированного угля, были выполнены исследования зависимости комплексного электрического сопротивления этого конденсатора Z от частоты напряжения питания.

При этом путем измерений значений падений напряжения на постоянном резисторе вычислялись значения силы переменного тока, протекающего через делитель напряжения, а по результатам измерений значений падения напряжения на угольной ячейке и найденному соответствующему значению тока рассчитывалось комплексное электрическое сопротивление угольной ячейки. Полученная зависимость комплексного сопротивления ячейки от частоты представлена на рис. 3а. Видно, что до частоты примерно 1 кГц сопротивление Z практически остается постоянным, а с увеличением частоты оно заметно уменьшается. Так, при частоте 6 кГц это сопротивление примерно в 4 раза меньше, чем при частоте в 1 кГц. Для того чтобы исключить влияние частоты питающего напряжения на результаты измерений, все дальнейшие исследования осуществлялись при частоте напряжения питания 1 кГц.

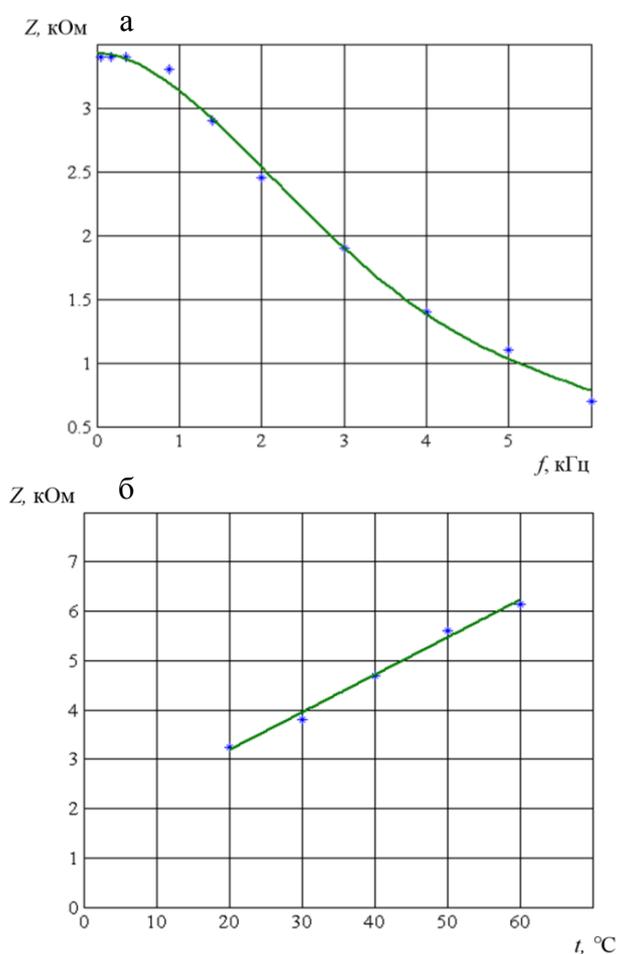


Рис. 3. Зависимость комплексного электрического сопротивления угольной ячейки: а – от частоты питающего напряжения; б – от температуры

Для определения зависимости комплексного сопротивления ячейки от температуры в термостате устанавливались значения температуры 20, 30, 40, 50 и 600°C. На рис. 3б показана зависимость комплексного сопротивления ячейки от температу-

ры. Видно, что комплексное сопротивление ячейки существенно возрастает с увеличением температуры. Эта величина составляет $\sim 0,075$ кОм на градус, что определяет необходимость термостатирования ячейки при проведении исследований эффекта изменения электропроводности порошка активированного угля при сорбции газов.

На описанной выше установке (см. рис. 2) при температуре 20°C и напряжении 2 В были выполнены измерения сопротивления ячейки при заполнении ее различными газами. Перед заполнением ячейки каждым газом она в течение 2 минут промывалась азотом, поступающим из баллона через стабилизатор давления, переменный дроссель с объемным расходом, равным 2 л/ч. После этого трехходовой кран устанавливался в положение, показанное на рис. 2. Предварительно отобранная порция газа вводилась в ячейку с помощью шприца, после чего измерялось сопротивление ячейки.

Было установлено, что, как и при измерениях сопротивления ячейки на переменном токе, ее комплексное электрическое сопротивление изменяется, а именно: при сорбции метана и диоксида углерода оно уменьшается на 4...5 %, а при сорбции пропана – на 15...17 %. Напротив, при сорбции гелия и водорода комплексное сопротивление ячейки увеличивается на 1...1,5 %.

Таким образом, в результате предварительных исследований обнаруженного эффекта изменения электропроводности порошка активированного угля установлено, что различные газы изменяют при сорбции комплексное электрическое сопротивление ячейки, заполненной активированным углем.

Для определения возможности использования этого эффекта в аналитической технике (например, для измерения концентрации газов) была собрана экспериментальная установка, схема которой показана на рис. 4. Основным элементом установки являлся газовый детектор, имеющий две камеры – измерительную и сравнительную, заполненные порошком активированного угля, конструкция которых идентична описанной выше ячейке (см. рис. 1). Использование двух ячеек обеспечило возможность проведения дифференциального измерения, что является распространенным приемом уменьшения аддитивной погрешности при детектировании газов и жидкостей. Для измерения разбаланса моста использован усилитель низкой частоты типа У4-29 и выпрямитель. Сигнал с выпрямителя посылался через резисторный делитель напряжения на электронный потенциометр типа КСП-4. Экспериментальная установка обеспечивала исследование детектора в импульсном режиме работы с большой пробой анализируемого газа [5], позволяющем имитировать непрерывную работу детекторов, многократно уменьшать количество газов, необходимых для исследований, и существенно сокращать затраты времени на их проведение. Сущность данного режима работы состоит во введении постоянной по объему пробы анализируемого газа в поток газа-носителя, протекающего через детектор с постоянным объемом расхода. При таком режиме работы проба газа, введенная в поток газа-носителя вне зависимости от его физических свойств, приобретает постоянную скорость, равную скорости потока газа-носителя. Реализация такого режима работы в установке осуществлялась с помощью стабилизатора давления, подключенного к баллону газа-носителя, переменных дросселей, колонки, представляющей собой металлическую трубку с внутренним диаметром 3 мм и длиной 1 м, и ручного дозатора с дозируемым объемом, равным 30 мл.

При работе установки газ-носитель (азот) из баллона (на рис. 2 не показан) через стабилизатор давления подводился к переменным дросселям. Объемный расход устанавливался равным 2 л/ч. Как видно из схемы (рис. 4), поток газа-носителя из дросселя 2 поступает непосредственно в сравнительную ячейку детектора, а поток газа-носителя из дросселя Др1 поступает в измерительную ячейку детектора, пройдя предварительно через дозатор и колонку. Измерения с помощью установки осуществлялись

при температуре 20°C следующим образом. После включения и установки всех режимных параметров (расход газа носителя в ячейке 2 л/ч, напряжение питания неуравновешенного моста 2 В и коэффициент усиления 10) с помощью резистора R_0 ($R_0 = 0,5$ кОм) устанавливалось нулевое значение разбаланса неуравновешенного моста.

Установка (рис. 4) обеспечивала работу в двух режимах: «подготовки» и «анализа».

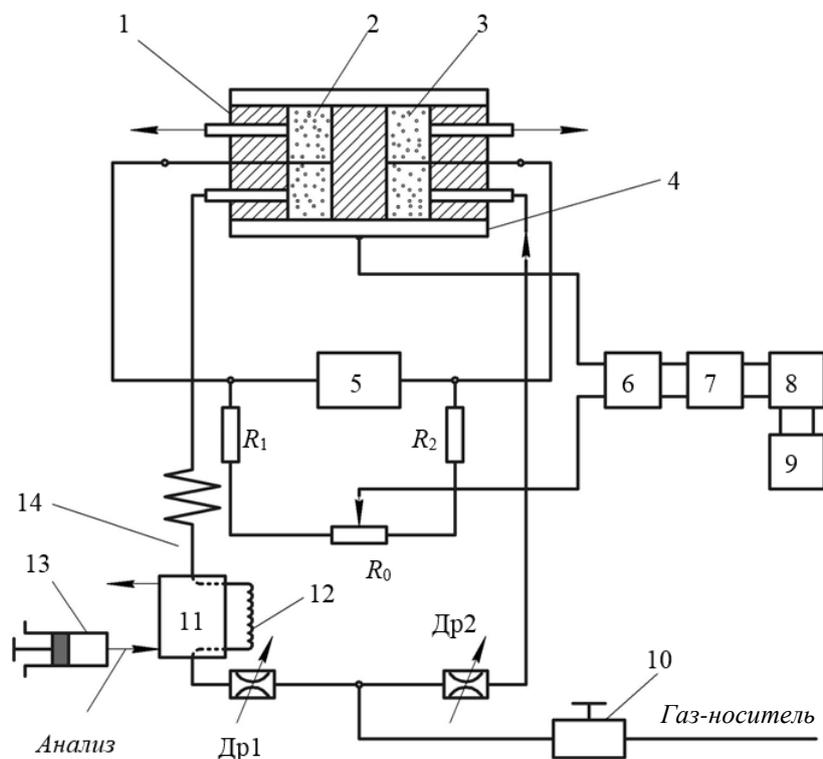


Рис. 4. Схема установки для измерения концентрации газов с помощью угольного сорбционно-кондуктометрического детектора: 1 – детектор; 2 и 3 – измерительная и сравнительная камеры детектора; 4 – общий электрод; 5 – стабилизированный источник электропитания; 6 – выпрямитель; 7 – фильтр; 8 – делитель напряжения; 9 – электронный потенциометр; 10 – стабилизатор давления газа-носителя; 11 – ручной дозатор; 12 – дозируемый объем; 13 – шприц; 14 – колонка; Др1 и Др2 – переменные пневматические дроссели; R_1 и R_2 – постоянные резисторы ($R_1 = 1,0$ кОм; $R_2 = 1,0$ кОм); R_0 – переменный резистор ($R_0 = 0,5$ кОм)

В режиме «подготовка» каналы дозатора соединялись таким образом, чтобы анализируемый газ, вводимый в дозатор шприцем, протекал через дозируемый объем. В режиме «анализ» каналы дозатора соединялись так, как это показано на рис. 4 пунктирными линиями, а поток газа-носителя из дросселя Др 1 с постоянным объемным расходом транспортировал отобранную пробу анализируемого газа через колонку в измерительную ячейку детектора.

Наличие колонки в схеме установки необходимо по той причине, что при переключении каналов дозатора происходит кратковременное прерывание газового потока, что может привести к смещению начального уровня сигнала детектора. Наличие колонки исключает наложение этого смещения на полезный сигнал детектора,

возникающий в момент поступления пробы анализируемого газа в измерительную камеру детектора. Режим работы сравнительной ячейки детектора остается постоянным, а в измерительную ячейку поступает проба анализируемого газа, что изменяет ее сопротивление, а это вызывает разбаланс неравновесного электрического моста. Последний после усиления, выпрямления и фильтрации регистрируется на диаграммной ленте потенциометра и имеет вид трапеции, амплитуда (высота) которой является параметром, несущим информацию о концентрации анализируемого газа в потоке газа-носителя. С помощью описанной установки были выполнены измерения объемных концентраций смесей метана, пропана и диоксида углерода с азотом. Результаты этих измерений, представленные на рис. 5 в виде зависимостей расбаланса моста от объемной концентрации различных газов в азоте C , % об., подтверждают возможность использования эффекта изменения электропроводности порошка активированного угля для создания газоанализаторов.

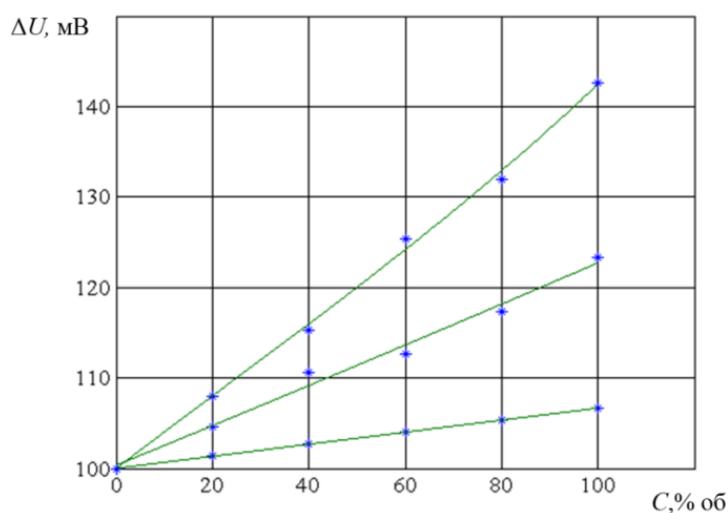


Рис. 5. Зависимости сигнала детектора от концентрации газов:
1 – пропан; 2 – диоксид углерода; 3 – метан

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Описанные выше результаты экспериментальных исследований, по-видимому, следует рассматривать как предварительные, демонстрирующие возможность использования эффекта изменения электропроводности порошка активированного угля в аналитической технике. Представляется целесообразным проведение комплексных исследований, а именно: выявление физико-химических закономерностей обнаруженного эффекта; математическое описание эффекта; проведение исследований электропроводности известных сортов активированного угля, а также белого активированного угля; выявление информационных возможностей обнаруженного эффекта.

ЛИТЕРАТУРА

- Илясов Л.В. Акустопарные измерительные преобразователи // *Вестник Тверского государственного технического университета*. 2018. Вып. 34. № 2. С. 3–10.
- Геологический словарь: в 2 т. / под ред. К.Н. Паффенгольца. М.: Недра. 1978. 942 с.
- Машкина С.В. Электрический нагрев неэлектропроводного дисперсного сырья при производстве активированного угля. Автореферат дисс... канд. техн. наук. Казахстан, Алматы, 2009. 21 с.

4. Сушев С.В. Экспериментальное и теоретическое обоснование процессов электрогенерации зернистых слоев активированного угля: на примере рекуперации галогензамещенных углеводородов. Дисс. ... канд. техн. наук. М., 1998. 127 с.
5. Фарзана Н.Г., Илясов Л.В. Автоматические детекторы газов и жидкостей. М.: Энергоатомиздат. 1983. 96 с.
6. Бражников В.В. Детекторы для хроматографии. М.: Машиностроение. 1992. 320 с.

INVESTIGATION OF ACTIVATED CARBON ELECTRICAL CONDUCTIVITY CHANGE APPLICATION IN ANALYTICAL TECHNIC

L.V. ILIASOV, Dr Sci

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

In this article are discussed results of activated carbon electrical conductivity change in case of gas sorption and application of this effect in analytical technic. Special constructed cell filled with activated carbon consist of dielectrical box and imputed metallic disk electrode, served as a cell bottom, was used for providing experiments. A rod electrode maintained near cell diameter serves as a second electrode. Unbalanced electric bridge was used for cell conductivity measurements. Experiments were provided using alternative and direct current. Active and complex cell resistance decrease during methane or carbon dioxide sorption for 4...5 %, and decrease for 15...17 % during propane sorption. On the contrary in case helium or hydrogen sorption cell resistance increase for 1...1.5 %. Base on this effect differential gas detector was developed using two analytical cells. The differential gas detector was used for binary gas mixtures analysis. The necessity of further investigation was substantiated to study the physical nature of investigated effect, development of its mathematical model and determination of its informational capacity.

Keywords: process control, electrical conductivity, activated carbon, sorption, gas, alternative and direct current, composition analysis.

REFERENCES

1. Ilyasov L.V. Customary transducers // *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2018. V. 34, No 2, pp. 3–10. (In Russian).
2. *Geologicheskii slovar': v 2 tomakh* [Geological dictionary: in 2 vol.] / sub. edited by K.N. Paffenholz. Moscow: Nedra. 1978. 942 p. (In Russian).
3. Mashkina S.V. Electric heating of non-conductive dispersed raw materials in the production of activated carbon: Avtoreferat Cand. Diss. (Engineering). Kazakhstan, Almaty, 2009. 21 p.
4. Sushchev S.V. Experimental and theoretical substantiation of the processes of electrogeneration of granular layers of activated carbon: For example, the recovery of halogenated hydrocarbons. Cand. Diss. (Engineering). Moscow, 1998. 127 p. (In Russian).
5. Farzana N.G., Ilyasov L.V. *Avtomaticheskiye detektory gazov i zhidkostey* [Automatic detectors of gases and liquids]. Moscow: Energoatomizdat, 1983. 96 p.
6. Brazhnikov V.V. *Detektory dlya khromatografii* [Detectors for chromatography]. Moscow: Mechanical Engineering, 1992. 320 p. (In Russian).

ХРОНИКА

АМАРЯН Л.С. – ОСНОВАТЕЛЬ ТВЕРСКОЙ НАУЧНОЙ ШКОЛЫ МЕХАНИКИ ТОРФА И ТОРФЯНОЙ ЗАЛЕЖИ (к 90-летию со дня рождения)

Б.Ф. ЗЮЗИН, д-р техн. наук, Л.В. КОПЕНКИНА, канд. техн. наук

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

Л.С. Амарян (1929–2012) – основатель тверской научной школы в области механики торфа и торфяной залежи. В калининский период своей жизни он разработал оригинальные методы и приборы для изучения структурно-механических свойств малоразложившегося торфа и торфяных залежей. В московский период Л.С. Амарян разрабатывал методы и оборудование для оценки несущей способности слабых грунтов при строительстве дорог и объектов для разведки и добычи нефти и газа в Сибири. Исследовательские комплексы, созданные Л.С. Амаряном с участием ученых КПИ, применяются в практике инженерно-геологических изысканий. Итоги работ были обобщены в его монографиях.

Ключевые слова: история торфяного дела, механика торфа, торфяная залежь, слабые грунты, Амарян Л.С.



Профессор Л.С. Амарян

Исполняется 90 лет со дня рождения профессора Л.С. Амаряна (1929–2012) – основателя тверской научной школы в области механики торфа и торфяной залежи, достойно занимающего почетное место в плеяде выдающихся преподавателей и сотрудников в истории нашего вуза [1] и истории торфяного дела.

Амарян Лено Самвелович родился 6 марта 1929 г. в городе Горис Армянской ССР. Он окончил механический факультет Московского торфяного института по специальности «Торфяные машины» (1947–1952), получив квалификацию «инженер-механик».

Л.С. Амарян работал на Орехово-Зуевском машиностроительном заводе «Грансторфмаш» (1952–1959), прошел путь от сменного мастера механического цеха, начальника литейного цеха до главного инженера и директора.

В 1957 г. на Дулевском и Чистом торфопредприятиях Орехово-Зуевского торфотреста была испытана прицепная к трактору стилочная машина барабанного типа, созданная под руководством Л.С. Амаряна на Орехово-Зуевском заводе торфяного машиностроения.

В 1956 г. Л.С. Амарян поступил в аспирантуру Московского торфяного института.

В 1958 г. Л.С. Амарян получил авторское свидетельство на устройство для транспортирования и выстилки торфомассы по полю стилки (А.с. № 111078), состоящее из прицепного к трактору барабана, снабженного по оси приводным шнеком для подачи торфомассы. С целью использования барабана в качестве вместилища для

торфомассы и питателя шнека в период выстилки барабан перекрыт с торцов щитами с центральными отверстиями для шнека. С одной наружной торцевой стороны барабан снабжен приемным бункером для торфомассы, в который выступает приемный конец шнека, с другой наружной торцевой стороны – выпускным патрубком. На внутренней поверхности барабана радиально расположены скребки, перемещающие торфомассу из нижнего положения в верхнее во время качения барабана.

В том же году ученым было получено авторское свидетельство на оригинальное устройство для уборки фрезерного торфа (А.с. № 116210.), состоящее из прицепного к трактору полого барабана, у которого рабочим органом являются скребки, убирающие торф из-под носка скрепера, установленного сзади барабана. С целью улучшения выгрузки торфа барабан снабжен разгружающим шнеком. С целью подачи торфа к шнеку внутри полого барабана приварены пассивные лопасти. Для предотвращения захвата пней скрепер установлен на катке, с помощью которого носок скрепера приподнимается, обходя пни и оставляя их на поле.

С 1960 г. Л.С. Амарян работал в Калининском политехническом институте. В научно-исследовательском отделе он возглавил группу механиков и технологов, занимавшихся проблемой создания технологии и оборудования для производства торфяной подстилки. В кратчайшие сроки Л.С. Амаряну и его группе удалось разработать оригинальные методы и приборы для изучения структурно-механических свойств малоразложившегося торфа, спроектировать и внедрить технологию и оборудование по производству прессованной торфяной подстилки. На Оршинском торфопредприятии был построен и введен в эксплуатацию опытный завод.

Изучение связности и упругих свойств торфяной подстилки, закономерностей процесса уплотнения, трения и бокового давления, зависимости их от ботанического состава, степени разложения, влажности, размера частиц, скорости обжатия, давления прессования в процессе получения такого вида торфяной подстилки было выполнено Л.С. Амаряном под руководством члена-корреспондента Академии строительства и архитектуры СССР, доктора технических наук, профессора В.Г. Булычева [2–5].

В 1961 г. Лено Самвелович Амарян защитил кандидатскую диссертацию на тему «Изучение закономерностей уплотнения и непрерывного брикетирования торфяной подстилки». Эта работа позволила обосновать новое технологическое направление по брикетированию торфяной подстилки в плиты непрерывным способом на ротационном брикетном прессе [4]. В связи с тем, что ротационный брикетный пресс с параллельно движущимися формами был создан впервые в торфяной отрасли (А.с. № 135387, 1960 г., авторы – Л.С. Амарян, А.А. Соколов, М.Г. Булышко, Д.И. Блох), Л.С. Амарян выполнил ряд технологических и энергетических расчетов данного пресса. Ротационный брикетный пресс с двусторонним непрерывным обжатием материала между параллельно движущимися формами при изменении скорости обжатия и давления прессования в обратной пропорции обеспечивал высокую производительность, имел малую энерго- и металлоемкость.

Кандидатская диссертация Л.С. Амаряна была первой среди квалификационных работ, посвященных производству торфоподстилочных плит. Исследования в области производства и использования торфяной подстилки продолжались.

В 1964 г. ученый получил авторское свидетельство на штемпельный пресс для производства торфоподстилочных плит (А.с. № 165646, соавтор – Беркович И.И.). Пресс содержит облегченную раму с двумя неподвижными матричными каналами, внутри которых установлены подвижные штемпели с приводом от электродвигателя (для возможности работы на сырье повышенной влажности). Он снабжен механизмом обвязки стопок плит, выполненным в виде подвижной каретки с укрепленными на ней лотками, расположенными в направлении матричных каналов. С целью легкого отрыва

стопки плит от прессуемого брикета на каретке установлены поворотные рычажные отсекатели с захватами, взаимодействующие с прессуемыми брикетами в зоне между неподвижным матричным каналом и подвижными лотками.

В 1962 г. Л.С. Амарян возглавил отдел научно-исследовательских работ, который благодаря энергичной деятельности ученого вскоре превратился в крупный научный центр.

В 1964–1965 гг. Л.С. Амарян получил авторские свидетельства:

многоступенчатый глубинный репер (А.с. № 165316, 1964 г., соавторы – Базин Е.Т., Мешалкин Г.В.) для измерения осадок торфяной залежи, содержащий монтажную плиту и направляющую трубу с измерительной головкой для одновременного измерения непрерывных или легких осадок различных по глубине слоев торфяной залежи;

прибор для исследования внешнего трения дисперсных материалов при высоком удельном давлении на площади контакта (А.с. № 167059, 1964 г., соавтор – Беркович И.И.);

устройство для измерения послойной деформации торфяной залежи (А.с. № 168259, 1965 г., соавторы – Базин Е.Т., Стрекалкин Е.А.) с целью повышения точности и производительности работ. Выполнено в виде катушек индуктивности с переменным числом витков, размещенных в корпусе из диэлектрика, на внешней поверхности которого свободно насажены кольца из немагнитного материала и закреплены стопоры, фиксирующие верхнее положение этих колец.



Л.С. Амарян в лаборатории

В 1967 г. Лено Самвелович Амарян защитил докторскую диссертацию на тему «Структурно-механические свойства торфяных залежей». Признавая высокий уровень представленной на защиту работы, научные консультанты, доктора наук В.Г. Булычев и В.М. Наумович, рекомендовали автору издать монографию с основными результатами, представленными в диссертации. Книга «Прочность и деформируемость торфяных грунтов» [6] вышла в издательстве «Недра» в 1969 г. В 1968 г. Л.С. Амарян стал профессором, с 1968 по 1973 гг. возглавлял кафедру «Конструкции и сооружения». В 1973 г. им была образована новая кафедра – «Основания и фундаменты» (ныне «Автомобильные дороги, основания и фундаменты»).

В 1967–1979 гг. Л.С. Амарян получил авторские свидетельства:

машина глубокого дренирования (А.с. № 205805, 1967 г., соавторы – Солопов С.Г., Булаевский Н.В., Никулин М.Д. и др.);

прибор для испытания слабых грунтов на сдвиг

в полевых условиях на различной глубине (А.с. № 218503, 1968 г.);

устройство для определения физико-механических свойств торфяных грунтов (А.с. № 333442, 1972 г., соавторы – Базин Е.Т., Исаев А.В.) для повышения точности измерения, имевшее конусный наконечник с взаимопересекающимися прорезями, в которых размещены лопасти крыльчатки;

устройство для отбора проб грунта и определения сопротивлений сдвигу и вдавливанию (А.с. № 346633, 1972 г., соавторы – Базин Е.Т., Лиштван И.И.);

устройство для отбора проб ненарушенного грунта с заданной глубины, исключаящее предварительную проходку скважины (А.с. № 441468, 1974 г);

устройство для определения сжимаемости слабых грунтов (А.с. № 511407, 1976 г.);
устройство для испытания грунта пенетрацией и вращательным срезом для
повышения точности измерения и надежности работы (А.с. № 694594, 1979 г.,
соавторы – Хрусталеv Е.Н., Миронов В.А.).

Л.С. Амарян предложил метод и прибор для определения истинной плотности
твердой фазы торфа УВД-3, описание которого приведено в учебном пособии [7, с. 162].
В основе прибора – идея использования закона Бойля – Мариотта для установления в
сжатом под давлением (на 3...4 порядка выше нормального) объема торфа, который
приближается к объему двухфазной системы (твердая фаза и вода). Влажность торфа
должна быть ниже 25 %. Объемом газовой фазы можно пренебречь из-за его малости.

В 1981–1984 гг. Л.С. Амарян на общественных началах возглавлял кафедру
«Торфяные машины и комплексы».



Кафедра «Торфяные машины и комплексы» (1981–1984):
первый ряд слева направо: доцент Л.О. Горцакалян, доцент Л.Н. Самсонов,
профессор Л.С. Амарян, доцент В.М. Шпынев;
второй ряд: доцент В.С. Волков, доцент Л.Ф. Коровицын,
доцент В.Ф. Синицын, доцент В.И. Цветков

В 1977 г. по приглашению Госстроя СССР (г. Москва) Л.С. Амарян перешел на
работу в Производственный и научно-исследовательский институт по инженерным
изысканиям в строительстве (ПНИИИС) на должность заведующего отделом техно-
логии и техники изысканий в строительстве.

В 1981–1984 гг. под руководством Л.С. Амаряна проводились полевые
исследования физико-механических свойств морских илов на Днепровско-Бугском
лимане, где было намечено строительство крупных гидротехнических сооружений.

С 1994 г. Л.С. Амарян заведовал сектором, разрабатывал методы и оборудование
для оценки несущей способности слабых грунтов при строительстве дорог и объектов
для разведки и добычи нефти и газа в Сибири.

Исследовательские комплексы, созданные Л.С. Амаряном с участием ученых КПИ (ТвГТУ), применяются в практике инженерно-геологических изысканий. Итоги работ были обобщены в монографии «Свойства слабых грунтов и методы их изучения» (изд-во «Недра», 1990) [8], получили международное признание (монография издана в 1993 г. в Нидерландах на английском языке). Им впервые были рассмотрены вопросы оценки физико-механических свойств органоминеральных грунтов с общих позиций. Это оказалось возможным благодаря созданию специальных средств и методик исследований, включающих статическое зондирование, вращательный срез, лопастные прессиометрические испытания, отбор монолитов, а также комплекс лабораторных испытаний. Такая работа была необходима для решения комплексных задач инженерного освоения территорий с распространением слабых органоминеральных грунтов в горнодобывающей промышленности, мелиоративном, транспортном, промышленном и гражданском строительстве, нефтегазопромысловом и трубопроводном строительстве, возведении портовых и гидротехнических сооружений.

Разработанная Л.С. Амаряном методика и портативные приборы позволили провести серьезные исследования структурно-механических свойств торфяных залежей в основных торфяно-болотных зонах страны, особенно в условиях заболоченных территорий Западной Сибири.

Важной проблемой было создание методов испытаний мерзлых грунтов применительно к условиям Крайнего Севера. Разработки в этой области были выполнены В.А. Мироновым, обобщены в докторской диссертации (научный консультант – Л.С. Амарян).

Работая в Москве, Лено Самвелович активно сотрудничал с ТГТУ в совместных научных исследованиях, руководил подготовкой кандидатов и докторов наук, участвовал в работе ГАК и диссертационного совета.

Под руководством Л.С. Амаряна в 1984–1987 гг. была разработана новая технология и средства механизации для производства высококачественного бытового торфяного топлива [9], а также комплекс оборудования для добычи кускового коммунально-бытового топлива с применением наращиваемого расстила и сушки с отрывом от подстила [10].

В 1988 г. Л.С. Амарян заложил основы учебно-практического курса дисциплины «Механика торфа и торфяной залежи», который преподается на кафедре ТМО более 30 лет [11, 12].

За 45 лет научно-педагогической деятельности им подготовлено около 40 кандидатов и докторов наук, опубликовано более 200 статей, 5 монографий, получено более 40 авторских свидетельств и патентов. Среди его учеников и последователей – профессора Л.Н. Самсонов, В.А. Миронов, И.И. Беркович.

Л.С. Амарян награжден золотыми, серебряными и бронзовыми медалями ВДНХ СССР. Получил звания «Почетный профессор ТвГТУ» (1997), Почетный изобретатель города Москвы. Информация о деятельности профессора Л.С. Амаряна внесена в «Золотую книгу Тверского государственного технического университета» [1].

В настоящее время творческое наследие профессора Л.С. Амаряна является достоянием не только отечественной науки и практики в области торфяного дела, но и признано мировым научным сообществом [8]. Исследования в области слабых грунтов актуальны в России и за рубежом [13]. Современные разработки позволяют развить результаты экспериментальных исследований водно-механических свойств торфяных залежей на основании положений теории дистортности.

Новое поколение исследователей тверской школы механиков торфа и торфяной залежи достойно продолжает развивать и обобщать теоретические подходы и экспериментальные работы в области торфяного дела.

ЛИТЕРАТУРА

1. Твардовский А.В., Миронов В.А., Зюзин Б.Ф. Золотая книга Тверского государственного технического университета. Тверь: ТвГТУ. 2015. 251 с.
2. Амарян Л.С. О физико-механических свойствах торфяной подстилки при ее прессовании в плиты // *Торфяная промышленность*. 1961. № 1. С. 32–35.
3. Амарян Л.С. О методике расчета процессов прессования торфяной подстилки в кипы и плиты // *Торфяная промышленность*. 1962. № 6. С. 13–16.
4. Амарян Л.С. Ротационный брикетный пресс (Брикетирование торфяной подстилки) // *Известия вузов. Горный журнал*. 1962. № 6. С. 13–15.
5. Амарян Л.С., Андржеевский А.М., Апенченко Л.С., Булышко М.Г. Опыт производства торфяной подстилки в виде плит // *Торфяная промышленность*. 1962. № 7. С. 27–28.
6. Амарян Л.С. Прочность и деформируемость торфяных грунтов. М.: Недра. 1969. 192 с.
7. Лиштван И.И., Базин Е.Т., Гамаюнов Н.И., Терентьев А.А. Физика и химия торфа. М.: Недра. 1989. 304 с.
8. Амарян Л.С. Свойства слабых грунтов и методы их изучения. М.: Недра. 1990. 220 с.
9. Авторское свидетельство № 1574817. *Способ получения кускового торфа* / Амарян Л.С., Самсонов Л.Н., Зюзин Б.Ф., Корзин Н.В., Воронков Б.Б. Заявл. 29.09.1988. Оpubл. 30.06.1990, Бюл. № 24.
10. Амарян Л.С., Самсонов Л.Н., Зюзин Б.Ф., Корзин Н.В. Авторское свидетельство № 1594274. *Способ получения кускового торфа*. Заявл. 25.01.1988. Оpubл. 23.09.1990, Бюл. № 35.
11. Амарян Л.С., Зюзин Б.Ф., Миронов В.А. Механика торфа и торфяной залежи: учеб. пособие. Калинин: КГУ. 1988. 95 с.
12. Амарян Л.С., Зюзин Б.Ф., Миронов В.А. и др. Лабораторный практикум по механике торфа и торфяной залежи / Калинин: КПИ. 1988. 96 с.
13. Амарян Л.С. Структурно-механические свойства торфяных залежей. Дисс... д-ра техн. наук. Калинин. 1967. 395 с.
14. Patel M.A., Patel H.S. A Review on Effects of Stabilizing Agents for Stabilization of Weak Soil // *Civil and Environmental Research*, 2012. V. 2, № 6, pp. 1–7.

AMARYAN L.S. – FOUNDER OF TVER SCIENTIFIC SCHOOL PEAT AND PEAT MECHANICS (on the 90th anniversary of birth)

B.F. ZYUZIN, Dr Sci, L.V. KOPENKINA, Cand Sci

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

L.S. Amaryan (1929 – 2012) – the founder of the Tver scientific school in the field of peat mechanics and peat deposits. During the Kalinin period of his life, he developed original methods and instruments for studying the structural-mechanical properties of less-decomposed peat and peat deposits. In the Moscow period L.S. Amaryan developed methods and equipment for assessing the carrying capacity of weak soils during the construction of roads and facilities for exploration and production of oil and gas in Siberia. Research complexes created by

L.S. Amaryan with the participation of KPI scientists are applied in the practice of engineering and geological surveys. The results of the work were summarized in his monographs.

Keywords: peat history, peat mechanics, peat deposits, weak soils, Amaryan L.S.

REFERENCES

1. Tvardovskiy A.V., Mironov V.A., Zyuzin B.F. Zolotaya kniga Tverskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta [Gold book of Tver State Technical University]. Tver: TvSTU. 2015. 251 p.
2. Amaryan L.S. About the physico-mechanical properties of peat litter when pressing into plates. *Torfyanaya promyshlennost*. 1961. No 1, pp. 32–35. (In Russian).
3. Amaryan L.S. About the method of calculation of processes of pressing of peat litter in packs and plates. *Torfyanaya promyshlennost*. 1962. No 6, pp. 13–16. (In Russian).
4. Amaryan L.S. Rotational briquette press (Peat litter briquetting) *Izvestiya vuzov. Gornyy zhurnal*. 1962. No 6, pp. 13–15. (In Russian).
5. Amaryan L.S., Andreevsky A.M., Panchenko L.S., Bulynko M.G. Experience of the production of peat litter in the form of plates. *Torfyanaya promyshlennost*. 1962. No 7, pp. 27. (In Russian).
6. Amaryan L.S. Prochnost' i deformiruyemost' torfyanikh gruntov [Strength and deformability of peat soils]. Moscow: Nedra. 1969. 192 p.
7. Lishtvan I.I., Bazin Ye.T., Gamayunov N.I., Terent'yev. A.A. Fizika i khimiya torfa [Physics and chemistry of peat]. Moscow: Nedra. 1989. 304 p.
8. Amaryan L.S. Svoystva slabykh gruntov i metody ikh izucheniya [Properties of weak soils and methods for their study]. Moscow: Nedra. 1990. 220 p.
9. Certificate of authorship № 1574817. *Sposob polucheniya kuskovogo torfa* [The method of obtaining sod peat] / Amaryan L.S., Samsonov L.N., Zyuzin B.F., Korzin N.V., Voronkov B.B. // Declared. 29.09.1988. Published 30.06.1990. Bulletin № 24. (In Russian).
10. Certificate of authorship № 1594274. *Sposob polucheniya kuskovogo torfa* [The method of obtaining sod peat] / Amaryan L.S., Samsonov L.N., Zyuzin B.F., Korzin N.V. Declared. 25.01.1988. Published 23.09.1990. Bulletin № 35. (In Russian).
11. Amaryan L.S., Zyuzin B.F., Mironov V.A. Mekhanika torfa i torfyanoy zalezhi [Mechanics of peat and peat deposits.]. Kalinin: KSU. 1988. 95 p.
12. Amaryan L.S., Zyuzin B.F., Mironov V.A. i dr. Laboratornyy praktikum po mekhanike torfa i torfyanoy zalezhi [Laboratory Workshop on the Mechanics of Peat and Peat Deposit] / Kalinin: KPI. 1988. 96 p.
13. Amaryan L.S. Structural and mechanical properties of peat deposits. Doct. Diss (Engineering). Kalinin. 1967. 395 p. (In Russian).
14. Patel M.A., Patel H.S. A Review on Effects of Stabilizing Agents for Stabilization of Weak Soil. *Civil and Environmental Research*, 2012. V. 2, No 6, pp. 1–7.