

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

**ВЕСТНИК
ТВЕРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА**

Серия «Технические науки»

**Научный рецензируемый журнал
№ 2 (2), 2019**

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. Гульяев, 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 ЭЛ № ФС77-74961 от 25 января 2019 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>Измайлов В.В., Новоселова М.В.</i> К вопросу о зависимости коэффициента трения от давления и скорости.....	5
<i>Болотов А.Н., Бурдо Г.Б., Новикова О.О., Новиков В.В.</i> Влияние магнитного поля на поверхностные эффекты при смазке магнитной жидкостью	14
<i>Егорова Ю.Б., Давыденко Л.В., Егоров Е.Н., Белова С.Б.</i> Перспективы развития механоводородной обработки титановых сплавов.....	23
<i>Архаров А.П.</i> Механизированный патрон для переустановки заготовки с наружной резьбой.....	35
<i>Полетаева Е.В., Горлов И.В.</i> Решение задач синтеза производственных систем на основе онтологии предметной области машиностроения.....	40

ТРАНСПОРТНОЕ, ГОРНОЕ И СТРОИТЕЛЬНОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

<i>Яблонев А.Л., Гусева А.М.</i> Полный факторный эксперимент по определению зависимости энергоемкости формования кускового торфа от коэффициента напора и скорости вращения шнека.....	51
<i>Горлов И.В.</i> Комплексная диагностика как основа прогнозирования технического состояния торфяной машины.....	61
<i>Синицын В.Ф., Копенкина Л.В.</i> Два метода силового и энергетического расчета цилиндрической фрезы.....	69

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

<i>Фоминых И.Б., Алексеев Н.П.</i> Моделирование рассуждений агента при жестких временных ограничениях на основе расширенных шаговых теорий.....	76
<i>Зоренко Д.А.</i> САЕ-моделирование напряженного состояния формообразующих элементов штампа при холодной объемной формовке.....	85
<i>Зыков И.И.</i> Обнаружение областей с космическим мусором на изображении вейвлет-преобразованиями.....	91

НОВОЕ В ИНЖЕНЕРНОМ ОБРАЗОВАНИИ

<i>Коротков М.А.</i> О подготовке специалистов в сфере «Инженерное дело, технологии и технические науки» по образовательным программам с учетом профессиональных стандартов.....	99
--	----

CONTENTS

MECHANICAL ENGINEERING AND MACHINE SCIENCE

<i>Izmailov V.V., Novoselova M.V.</i> On the problem of the friction coefficient dependence on pressure and speed.....	5
<i>Bolotov A.N., Burdo G.B., Novikova O.O., Novikov V.V.</i> Influence of magnetic field on surface effects when a magnetic fluid lubricant	14
<i>Egorova Yu.B., Davydenko L.V., Egorov E.N., Belova S.B.</i> Prospects for the development of machining hydrogenated processing of titanium alloys.....	23
<i>Arkharov A.P.</i> Mechanized chuck for reinstallation of workpiece with male thread.....	35
<i>Poletaeva E.V., Gorlov I.V.</i> Decision of industrial systems synthesis problems based ontology engineering.....	40

TRANSPORT, MINING AND CONSTRUCTION MACHINERY

<i>Yablonev A.L., Guseva A.M.</i> Full factorial experiment on determination of sod peat forming energy intensity dependence upon coefficient of pressure and molding of the screw rotation frequency.....	51
<i>Gorlov I.V.</i> Complex diagnostics as a basis for forecasting the technical condition of the peat machine.....	61
<i>Sinizin V.F., Kopenkina L.V.</i> Two methods for power and energy calculation of cylindrical milling cutter.....	69

INFORMATICS, COMPUTER FACILITIES AND MANAGEMENT

<i>Fominykh I.B., Alekseev N.P.</i> Modeling agent's discussions under hard time limitations on the basis of extended step theories.....	76
<i>Zorenko D.A.</i> CAE-modelling of tension of form-building elements of stamp at cold volume molding	85
<i>Zykov I.I.</i> Detection of areas with space junk on wavelet transform image.....	91

NEW IN ENGINEERING EDUCATION

<i>Korotkov M.A.</i> On the training of specialists in the field of «Engineering, Technology and Technical Sciences» for educational programs based on professional standards.....	99
--	----

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

УДК 621.891

К ВОПРОСУ О ЗАВИСИМОСТИ КОЭФФИЦИЕНТА ТРЕНИЯ ОТ ДАВЛЕНИЯ И СКОРОСТИ

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

Тверской государственный технический университет,
170026, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: iz2v@tvcom.ru

Приводятся результаты экспериментальных исследований зависимости силы трения и коэффициента трения от нормальной силы и скорости скольжения трущихся тел. Исследованы фрикционные пары из металлических и неметаллических материалов в условиях трения покоя и скольжения без смазочного материала. Показано, что зависимость силы трения от нормальной силы может выражаться как одночленным, так и двучленным выражениями, известными как законы трения Амонтона и Кулона. Если сила трения подчиняется закону Кулона, величина коэффициента трения, рассчитываемого как отношение силы трения к силе нормального давления, оказывается зависящей от величины последней. В то же время, если рассматривать законы Амонтона и Кулона как уравнения линейной регрессии, то соответствующие коэффициенты трения остаются постоянными в исследованном диапазоне нагрузок. Экспериментально показано, что коэффициент трения практически не зависит от скорости скольжения трущихся поверхностей при малых скоростях и слегка уменьшается с ростом скорости при больших скоростях.

Ключевые слова: сила трения, коэффициент трения, закон Амонтона, закон Кулона, скорость, нормальная нагрузка, линейная регрессия.

ВВЕДЕНИЕ

Коэффициент трения является одной из основных количественных характеристик фрикционных пар. Понятие коэффициента трения связано с двумя классическими законами, в которых обобщены результаты экспериментальных исследований процессов трения. В современной записи эти законы выражаются формулами:

закон Амонтона

$$T = f_A N; \quad (1)$$

закон Кулона

$$T = T(0) + f_C N, \quad (2)$$

где T – сила трения; N – сила нормального давления, приложенная к контакту трущихся тел; $T(0)$ – сила трения при $N = 0$ (величина, которую связывают с адгезионным взаимодействием трущихся поверхностей); f_A и f_C – коэффициенты трения по Амонтону и Кулону соответственно.

Уравнения (1) и (2) можно записать в относительных величинах:

$$\tau = f_A p_n, \quad (3)$$

$$\tau = \tau(0) + f_c p_n, \quad (4)$$

где $\tau = T/A_n$ – номинальное касательное напряжение в контакте; $p_n = T/A_n$ – номинальное контактное давление; A_n – номинальная (геометрическая) площадь контакта трущихся тел; $\tau(0)$ – касательное напряжение при $p_n = 0$. Законы трения Амонтона и Кулона эмпирические, то есть приближенные. Более того, оба закона стохастические, поскольку величина силы трения зависит от многих факторов, в том числе случайных по своей природе.

В числе факторов, влияющих на величину коэффициента трения, еще Амонтон указывал на силу нормального давления, время и скорость скольжения [1]. Под временем понимается продолжительность неподвижного контакта тел до начала их относительного перемещения под действием сдвигающей силы. Кулон к перечисленным факторам добавил природу материалов, из которых изготовлены трущиеся детали, и свойства смазочного материала на поверхности трения [1].

Не касаясь влияния физико-механических свойств материалов контактирующих деталей и смазочного материала, остановимся на зависимости фрикционных характеристик контакта от силы нормального давления и скорости относительного скольжения трущихся деталей. Дело в том, что мнения различных исследователей о характере влияния указанных факторов на силу и коэффициент трения, как и о самом факте наличия такого влияния, разнятся. В научной литературе можно встретить различные варианты количественных и качественных зависимостей коэффициента трения от силы нормального давления или скорости скольжения: убывающие, возрастающие, более сложные и неоднозначные. Также существуют свидетельства в пользу независимости коэффициента трения от указанных факторов.

Цель данной работы – на основании экспериментальных результатов и теоретических аргументов проанализировать природу зависимости коэффициента трения от силы нормального давления и скорости скольжения или обосновать причину отсутствия таковой зависимости. никоим образом не претендуя на окончательный характер результатов, авторы надеются данной статьей внести вклад в исследование такого сложного явления, как фрикционное взаимодействие.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ

Когда речь заходит о зависимости коэффициента трения от нагрузки, по умолчанию имеется в виду величина коэффициента трения, определяемая как отношение силы трения к силе нормального давления $f = T/N$. Такое определение коэффициента трения дает, например, ГОСТ 27674-88 «Трение, изнашивание и смазка. Термины и определения», а также различные справочные издания [2, 3]. Очевидно, что определять таким образом коэффициент трения можно только на основании закона Амонтона. Однако следует заметить, что, если уравнение (1) претендует на статус закона, выражающего пропорциональность силы трения силе нормального давления, то коэффициент пропорциональности f_A в уравнениях (1) и (3) не должен зависеть от N или p_n (в пределах экспериментальной погрешности) [4].

Если считать, что сила трения подчиняется более общему закону Кулона, то коэффициент трения f_c можно определять только по изменению соответствующих величин: $f_c = dT/dN$, или $f_c \approx \Delta T/\Delta N$. Величина же $T/N = T(0)/N + f_c$ с очевидностью зависит от нормальной нагрузки N даже при постоянстве f_c . Это обстоятельство наглядно иллюстрируется рис. 1, из которого видно, что степень зависимости отношения T/N от величины нормальной силы N определяется соотношением входящих в формулу (1) или (3) величин. При слабой адгезии контактирующих поверхностей

(малая величина $T(0)$) отношение T/N слабо зависит от N даже при описании силы трения законом Кулона.

Если признать, что законы Амонтона и Кулона по своей природе стохастические, то уравнения (2) и (4) следует трактовать как уравнения линейной регрессии, связывающие независимые величины N или p_n и зависимые величины T или τ , а уравнения (1) и (3) – как частные случаи линейной регрессии при $T(0) = 0$ и $\tau(0) = 0$ соответственно. В этом случае коэффициенты f_A и f_C должны определяться методами математической статистики с проверкой их на статистическую значимость по соответствующим критериям.

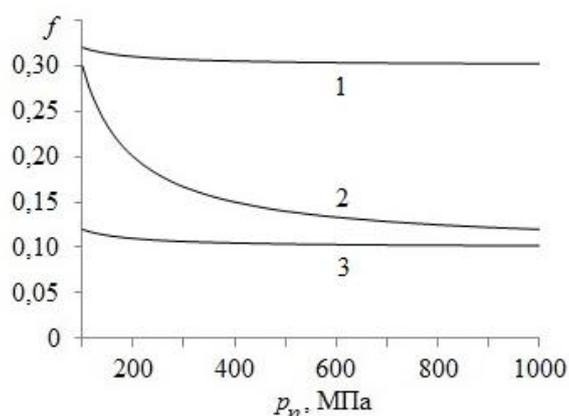


Рис. 1. Зависимость коэффициента трения $f = \tau/p_n$ от номинального давления:
 1 – $\tau(0) = 2$ МПа, $f_C = 0,3$; 2 – $\tau(0) = 20$ МПа, $f_C = 0,1$; 3 – $\tau(0) = 2$ МПа, $f_C = 0,1$

Уравнение (4) с математической точки зрения тождественно хорошо известной в трибологии двучленной зависимости удельной силы трения от фактического контактного давления И.В. Крагельского:

$$\tau_r = \tau_{r0} + \beta p_r. \quad (5)$$

Однако это сходство только внешнее. В уравнении (5) величины τ_r и p_r рассчитаны относительно фактической площади контакта A_r , образованной суммой площадок контакта контактирующих неровностей шероховатых поверхностей деталей фрикционной пары: $\tau_r = T/A_r$, $p_r = N/A_r$. Аналогичные величины в уравнении (3) рассчитаны относительно номинальной (геометрической) площади контакта A_n . Зависимость (5) для рутинных расчетно-конструкторских целей малопригодна, так как расчетное и тем более экспериментальное определение фактической площади контакта представляет непростую задачу и требует участия квалифицированного специалиста-триболога. В то же время для научно-исследовательских целей больший интерес представляет именно уравнение (5), так как величины τ_r и p_r являются прочностными характеристиками фрикционного контакта, своеобразными аналогами прочностных характеристик материалов в механике деформируемого твердого тела.

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования являлись модельные и реальные образцы различных фрикционных узлов. Условия трения и материалы контактирующих пар менялись в широких пределах, что позволило получить представительный экспериментальный материал. Испытания проводились по схемам трения плоскость/плоскость и шар/плоскость в режиме трения покоя и скольжения. Смазочные материалы не

использовались. В качестве материалов пар трения использовались чистые металлы и сплавы, композиционные материалы, полученные методами порошковой металлургии, неметаллические материалы. Более подробные сведения об условиях испытаний приведены далее при описании конкретных результатов.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Зависимость силы трения и коэффициента трения от нормального давления. Для иллюстрации влияния адгезионного взаимодействия трущихся поверхностей на величину коэффициента трения $f = T/N$ на рис. 2 и 3 представлены фрикционные характеристики двух различных по природе фрикционных пар: металл по металлу и металл по неметаллу. На рис. 2 представлены фрикционные характеристики пары трения золото по золоту. Схема трения – шар/плоскость. Радиус шарового образца 0,5 мм. В эксперименте измерялась максимальная сила трения покоя и рассчитывался соответствующий коэффициент трения. Золото выбрано в качестве материала трущихся деталей из соображений его химической инертности, то есть стойкости к образованию поверхностных пленок.

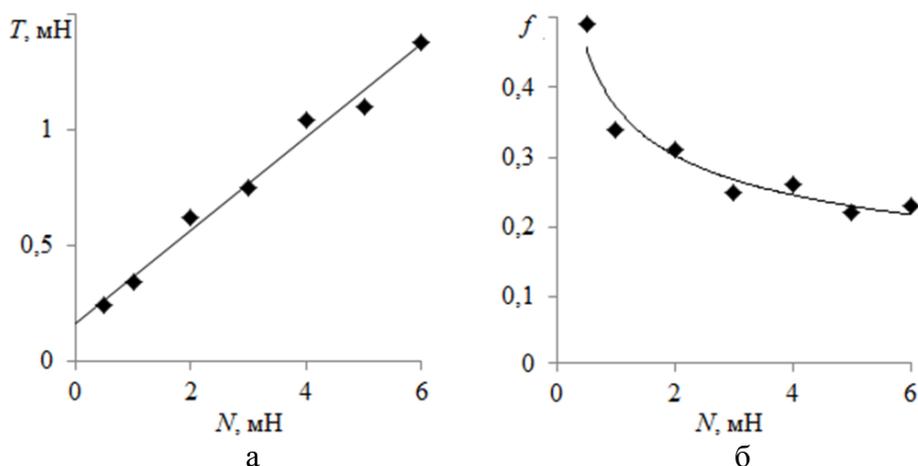


Рис. 2. Зависимости от нормальной нагрузки: а – силы трения; б – коэффициента трения. Пара трения – золото/золото

На рис. 2а наглядно видно наличие силы трения $T(0)$ и линейная зависимость силы трения от нормальной силы, то есть к данной паре трения применим закон Кулона (см. формулу (2)). Методами математической статистики определены коэффициенты $T(0)$ и f_c в формуле (2) как коэффициенты линейной регрессии. Их значения следующие: $T(0) = 0,16 \pm 0,10$ мН; $f_c = 0,20 \pm 0,03$. Коэффициенты статистически значимы на уровне $p < 0,05$. В полном соответствии с рис. 1 коэффициент трения $f = T/N$ убывает с ростом нормальной нагрузки на контакт (см. рис. 2б). Его максимальное значение при малых нагрузках более чем вдвое превосходит величину коэффициента трения по Кулону f_c . С ростом нагрузки $f \rightarrow f_c$.

Для сравнения на рис. 3 приведены фрикционные характеристики пары трения металл/неметалл. Схема трения – шар/плоскость, шаровой образец выполнен из золота, плоский – из нитрида титана TiN (покрытие). Все остальные условия трения такие же, как для пары Au/Au.

Величина $T(0)$ в данном случае оказалась статистически незначима, то есть по сути к данной паре применим закон трения Амонтона (см. уравнение (1)). Коэффициенты трения по Кулону $f_c = 0,52 \pm 0,03$ и Амонтону $f_A = 0,54 \pm 0,02$ практически

совпадают в пределах погрешности. Коэффициент трения $f = T/N$ очень слабо зависит от величины нормальной нагрузки, что полностью согласуется с рис. 1.

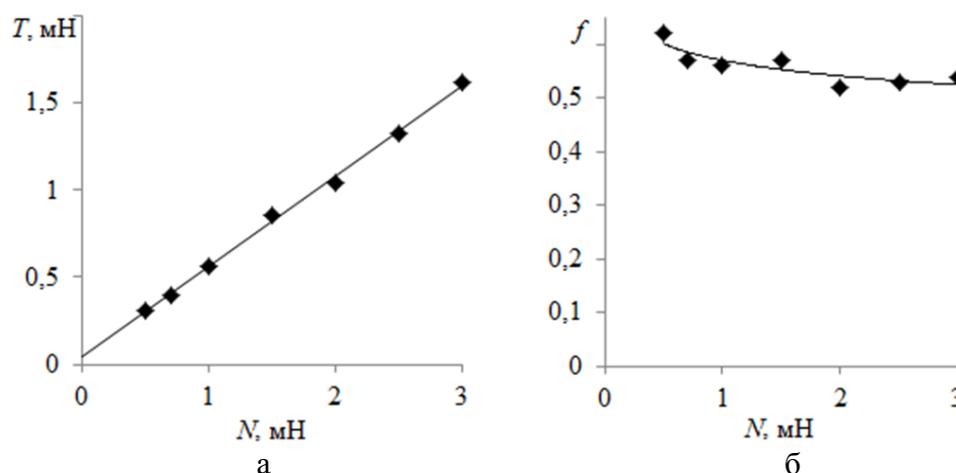


Рис. 3. Зависимости от нормальной нагрузки: а – силы трения; б – коэффициента трения. Пара трения – золото/нитрид титана (покрытие)

В рассмотренных выше фрикционных парах реализуется статическое трение. Фрикционные характеристики пар трения в режиме относительного скольжения рассмотрим далее на примере такого типичного узла трения, как скользящий электрический контакт.

На рис. 4а показаны зависимости касательного напряжения в контакте $\tau = T/A_n$ от нормального давления $p_n = N/A_n$ для некоторых пар трения из электроконтактных материалов. Одна из контактирующих деталей изготовлена из меди, другая – из графитосодержащих композиционных материалов на основе меди или серебра. Скорость относительного перемещения контактирующих поверхностей 0,5 мм/с. Диапазон контактных давлений характерен для скользящих электрических контактов такого типа. Точками показаны результаты экспериментов; линиями – регрессионные зависимости.

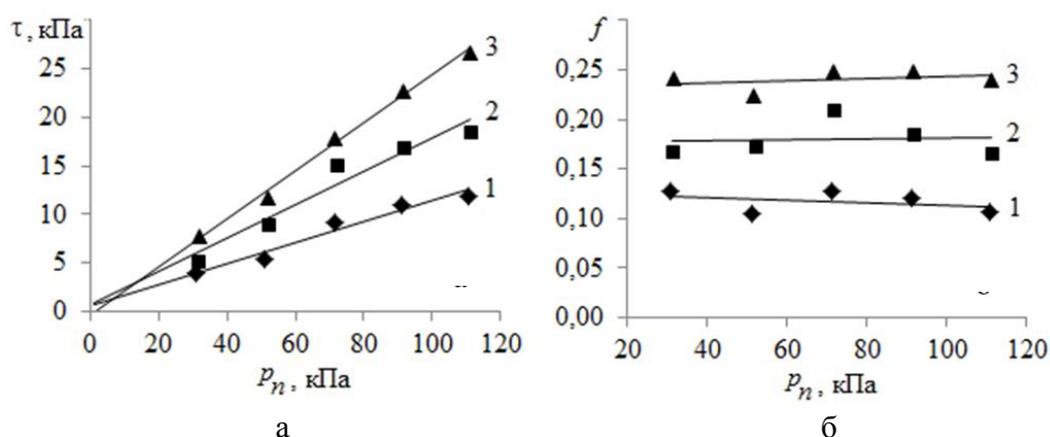


Рис. 4. Зависимости от нормального давления: а – касательного напряжения в контакте; б – коэффициента трения. Материалы пар трения: 1 – медь/серебрографитовая композиция (30 % С); 2 – медь/меднографитовая композиция (30 % С); 3 – медь/серебрографитовая композиция (10 % С)

Методами математической статистики найдены коэффициенты $\tau(0)$ и f_c линейной регрессии зависимой переменной τ на независимую переменную p_n . Для всех

пар трения коэффициенты $\tau(0)$ оказались статистически незначимы. Коэффициенты f_C (коэффициенты трения по Кулону) соответственно равны: для пары 1 – $f_C = 0,11 \pm 0,04$; для пары 2 – $f_C = 0,17 \pm 0,08$; для пары 3 – $f_C = 0,25 \pm 0,03$. Все коэффициенты статистически значимы на уровне $p < 0,05$, что дает основание принять гипотезу о линейной зависимости величин τ и p_n . Таким образом, для этих пар трения фактически выполняется закон Амонтона. Коэффициент трения $f = \tau/p_n$ для этих пар практически постоянный (см. рис. 4б), что подтверждает применимость к ним закона Амонтона.

Иная картина наблюдается на рис. 5. Пара трения, фрикционные характеристики которой представлены на рис. 5, с очевидностью описывается законом Кулона, что следует из рис. 5а и формулы (4). При отсутствии нормальной нагрузки в контакте сила трения не равна нулю, что приводит к непостоянству коэффициента трения $f = \tau/p_n$ (рис. 5б). Рассчитанные методами математической статистики коэффициенты $\tau(0)$ и f_C линейной регрессии зависимой переменной τ на независимую переменную p_n (см. формулу (4)) следующие: $\tau(0) = 3,6 \pm 1,4$ кПа; $f_C = 0,084 \pm 0,018$. Коэффициенты статистически значимы на уровне $p < 0,05$. На рис. 5 точками показаны результаты экспериментов; линии – регрессионные зависимости.

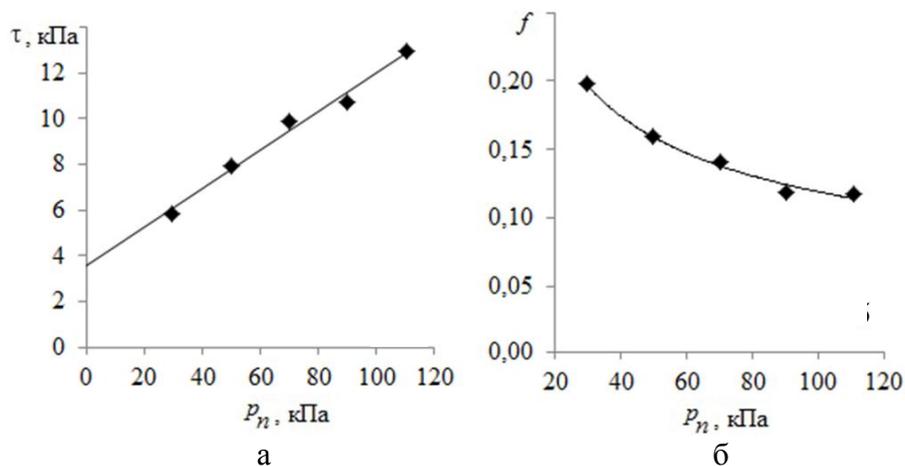


Рис. 5. Зависимости от нормального давления: а – касательного напряжения в контакте; б – коэффициента трения. Материалы пар трения: медь/меднографитовая композиция (20 % С)

Зависимость силы трения и коэффициента трения от скорости скольжения трущихся тел. К числу закономерностей внешнего трения, сформулированных Амонтоном и Кулоном, относится утверждение о независимости силы трения от скорости скольжения трущихся тел [1]. При этом по умолчанию имеется в виду модуль силы трения. Но поскольку сила трения, как всякая сила, характеризуется еще и направлением, то, строго говоря, она неразрывно связана со скоростью движения тела, будучи всегда направлена противоположно вектору скорости. С этой точки зрения закон Амонтона для трения скольжения правильнее было бы записывать в виде [5]:

$$T = -f_A N \operatorname{sgn} V,$$

где $\operatorname{sgn} V = \begin{cases} 1, & \text{при } V > 0 \\ -1, & \text{при } V < 0 \end{cases}$; T и V – проекции силы трения и скорости тела на направление координатной оси, относительно которой рассматривается движение.

Как и все эмпирические законы, независимость модуля силы трения от скорости скольжения является приближением, справедливым в определенном диапазоне

скоростей. Отступления от этого правила могут проявляться как в возрастании силы трения, так и в ее убывании с ростом скорости, в зависимости от диапазона величин скорости. Между тем зависимость силы трения от скорости важна для многих технических приложений, так как от нее зависит сам характер движения тел, в частности, возникновение фрикционных автоколебаний [6].

Пример зависимости коэффициента трения f от скорости скольжения V в диапазоне малых скоростей $0,01 \dots 1$ м/с представлен на рис. 6а для одной из пар трения, фрикционные характеристики которых приведены на рис. 4. Статистически значимая зависимость $f(V)$ отсутствует не только для этой пары трения, но и для остальных пар, представленных на рис. 4. Таким образом, в данном диапазоне скоростей для данных пар трения коэффициент трения можно считать независимым от скорости скольжения в пределах экспериментальной погрешности.

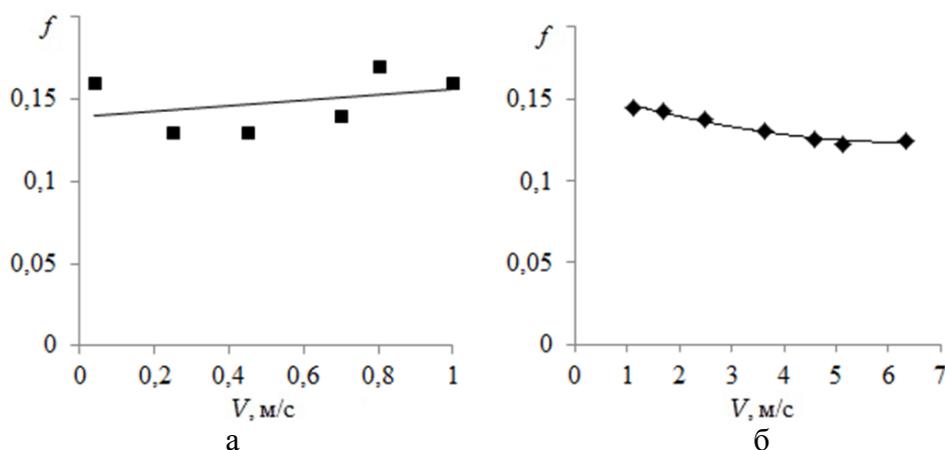


Рис. 6. Зависимость коэффициента трения от скорости скольжения.
 Материалы пар трения: а – медь/меднографитовая композиция (30 % С);
 б – медь/меднографитовая композиция (20 % С)

В диапазоне более высоких скоростей (см. рис. 6б) наблюдается незначительное снижение коэффициента трения с ростом скорости скольжения (эта зависимость статистически значима). Но и в этом случае скорость скольжения влияет на величину коэффициента трения незначительно: при семикратном увеличении скорости (от 1 до 7 м/с) коэффициент трения снизился примерно на 15 %.

Отметим, что убывающая зависимость силы (коэффициента) трения от скорости скольжения нежелательна, так как приводит к возникновению фрикционных автоколебаний и скачкам при трении (stick-slip) [6].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По причине своей сложной физической природы и зависимости от многих случайных факторов процесс внешнего трения плохо поддается теоретическому описанию. Тем не менее для практических, а часто и научных целей хорошо применимы классические законы трения Амонтона и Кулона. Характеризуя закон трения Амонтона (1), Р. Фейнман в своих знаменитых лекциях по физике отмечает, что хотя коэффициент трения «не очень постоянен, эта формула оказывается хорошим эмпирическим правилом, позволяющим прикидывать, какая сила понадобится в тех или иных практических или инженерных обстоятельствах» [7]. Вместе с тем данной статьей мы хотели обратить внимание вот на какое обстоятельство. Несмотря на то что еще в конце XVIII века Ш. Кулон предложил более точный двучленный закон трения (2), на

практике по-прежнему используется закон Амонтона, очевидно, ввиду его простоты. Как показано в данной статье, во многих случаях такая замена вполне оправдана. Но иногда пренебрежение свободным членом в уравнении (2), выражающем закон Кулона, приводит к тому, что коэффициент трения, определяемый как отношение силы трения к нормальной силе $f = T/N$, сам зависит от величины нормальной силы. В этом случае он теряет практический смысл, так как использовать его в расчетах силы трения в инженерных приложениях, о чем говорит Р. Фейнман, невозможно: уравнения (1) и (3) в этом случае не выражают никакой однозначной зависимости силы трения от силы нормального давления. Значения коэффициента трения $f = T/N$ применимы только для одной-единственной величины силы нормального давления N , для которой они рассчитаны, по ним нельзя прогнозировать изменение силы трения при изменении нагрузки на фрикционный контакт.

В то же время, как показано в данной статье, если использовать двучленную зависимость силы трения от нормальной силы (закон Кулона), то коэффициент трения f_C , входящий в эту зависимость, в отличие от коэффициента трения $f = T/N$, остается постоянным, не зависящим от нормальной силы. Такой коэффициент трения можно использовать для прогнозирования изменения силы трения при изменении нагрузки на фрикционный контакт.

Ввиду стохастической природы законов трения Амонтона и Кулона величины коэффициентов трения f_A и f_C в уравнениях (1)–(4), а также свободные члены $T(0)$ и $\tau(0)$ в уравнениях (2) и (4) соответственно должны находиться как коэффициенты линейной регрессии методами математической статистики с проверкой этих величин на статистическую значимость.

Что касается зависимости силы трения и коэффициента трения от скорости скольжения трущихся тел, авторы, разумеется, не рассчитывали закрыть этот вопрос данной статьей. В этом вопросе уместно также сослаться на Р. Фейнмана, который считает, что «этот закон трения (независимость коэффициента трения от скорости – авт.) относится к тем полуопытным законам, которые поняты не до конца и не становятся понятней, несмотря на огромные усилия» [7, с. 220]. Остается путь накопления экспериментальных результатов, применимых к конкретным условиям трения.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 17-08-00614).

ЛИТЕРАТУРА

1. Крагельский И.В., Щедров В.С. Развитие науки о трении. М.: изд. АН СССР. 1956. 236 с.
2. Физическая энциклопедия. М.: Научное издательство «Большая Российская энциклопедия». 1998. Т. 5. С. 165.
3. Словарь-справочник по трению, износу и смазке деталей машин. Киев: Наукова думка. 1990. С. 97.
4. Измайлов В.В., Новоселова М.В. Зависимость коэффициента трения от нагрузки и законы трения Амонтона и Кулона. *Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел, деталей технологического и энергетического оборудования: межвуз. сб. науч. тр.* Тверь: ТвГТУ. 2019. Вып. 12. С. 44–54.
5. Юнин Е.К. Загадки и парадоксы сухого трения. М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ». 2013. 128 с.
6. Попов В.Л. Механика контактного взаимодействия и физика трения. От нанотрибологии до динамики землетрясений. М.: ФИЗМАТЛИТ. 2013. 352 с.

ISSN 2687-0029. Вестник Тверского государственного технического университета.
Серия «Технические науки». № 2 (2), 2019

7. Фейнман Р.Ф., Лейтон Р.Б., Сэндс М. Фейнмановские лекции по физике. Вып. 1, 2. М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ». 2011. 440 с.

ON THE PROBLEM OF THE FRICTION COEFFICIENT DEPENDENCE ON PRESSURE AND SPEED

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

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

The results of the experimental investigation of the friction force and friction coefficient dependences on normal load and sliding speed are presented. The friction couples made of metals and nonmetals were studied at the conditions of static and sliding dry friction. It is shown that the dependence of a friction force on normal load may be described both by monomial and binomial expressions being known as Amontons' and Coulomb's laws of friction. In case the friction force follows the Coulomb's law the value of friction coefficient, being calculated as a friction force to normal load ratio, is found to depend on a normal load. At the same time in case the Amontons' and Coulomb's laws are considered as the linear regression equations the respective friction coefficients remain constant within the studied load range. It is shown experimentally that friction coefficient practically does not depend on sliding speed of rubbing surface at low speed values and slightly decreases with speed at high speed.

Keywords: friction force, friction coefficient, Amontons' law, Coulomb's law, speed, normal load, linear regression.

ACKNOWLEDGMENTS

This work was financially supported by RFBR, project 17-08-00614.

REFERENCES

1. Kragel'skij I.V., Shchedrov V.S. Razvitie nauki o trenii [Friction science development]. Moscow: Izd. AN SSSR. 1956. 236 p.
2. Fizicheskaya ehnciklopediya [Physical encyclopaedia]. M.: Nauchnoe izdatel'stvo «Bol'shaya Rossijskaya ehnciklopediya». 1998. V. 5. 165 p.
3. Slovar'-spravochnik po treniyu, iznosu i smazke detalej mashin [Glossary and reference book on friction, wear and lubrication of machine parts]. Kiev: Naukova dumka. 1990. 97 p.
4. Izmailov V.V., Novoselova M.V. The load dependence of friction coefficient and Amomtons' and Coulomb's friction laws. *Mechanics and physics of the processes on a surface and in a contact of solids, parts of manufacturing and power equipment*. Tver: TSTU. 2019. No 12, pp. 44–54. (In Russian).
5. Yunin E.K. Zagadki i paradoksy suhogo treniya [Mysteries and paradoxes of dry friction]. Moscow: Knizhnyj dom «LIBROKOM». 2013. 128 p.
6. Popov V.L. Mekhanika kontaktного vzaimodejstviya i fizika treniya. Ot nanotribologii do dinamiki zemletryasenij [Contact mechanics and physics of friction. From the nanotribology to the earthquake dynamics]. Moscow: FIZMATLIT. 2013. 352 p.
7. Feynman R.P., Leighton R.B., Sands M. Fejnmanovskie lekicii po fizike [The Feynman lectures on physics]. V. 1, 2. Moscow: Knizhnyj dom «LIBROKOM». 2011. 440 p.

ВЛИЯНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ПОВЕРХНОСТНЫЕ ЭФФЕКТЫ ПРИ СМАЗКЕ МАГНИТНОЙ ЖИДКОСТЬЮ

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 исследований влияния магнитного поля на поверхностные эффекты при трении в присутствии магнитных смазочных материалов. Установлено значительное воздействие магнитного поля на трибопараметры узлов трения, проявляющееся в увеличении интенсивности изнашивания в его присутствии (в частности, за счет увеличения концентрации олеиновой кислоты в растворе). Найден способ повысить характеристики узлов трения, работающих при смазке лимитированными дозами магнитного масла, путем активации скорости его растекания магнитным полем. Показано, что магнитное поле способствует пластифицированию взаимодействующих поверхностей, что ведет к уменьшению механической (деформационной) составляющей силы трения и особенно сильно проявляется при высоких контактных давлениях. Дана оценка влияния магнитного поля на энергетическое состояние материалов поверхностей трения. Установлено, что присутствие магнитного поля приводит к возрастанию концентрации поверхностно-активных молекул, вступающих в химическое взаимодействие с материалом поверхностей трения, и ускоряет их коррозионное разрушение.

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

ВВЕДЕНИЕ

Вопрос о влиянии магнитного поля на фрикционные характеристики трибоузлов важен с точки зрения динамического управления процессами, протекающими при трении. Активное применение новых перспективных смазочных материалов, имеющих в составе нанодисперсные магнитные наполнители [1–3], придает этому вопросу еще большую значимость. Использование магнитных смазочных масел предполагает возможность включения в конструкцию трибоузла оборудования для создания в зоне трения квазистационарного неоднородного магнитного поля для регулирования его трибопараметров [4–6]. Для таких узлов трения определение степени влияния магнитного поля на процессы, протекающие в зоне фрикционного контакта (и в частности, на поверхностные эффекты при трении), представляет значительный научный и практический интерес.

Целью работы являлось исследование влияния магнитного поля на наиболее существенные поверхностные эффекты при трении: скорость формирования адсорбционных слоев на поверхности трения, энергетическое состояние взаимодействующих материалов, коррозионные процессы в зоне контакта.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Влияние магнитного поля на триботехнические характеристики пары трения при граничном режиме смазывания исследовалось на установке МТП-М [7]. В конструкции машины трения реализуется схема «диск – пальчиковый образец». Исследования проводились для пары трения сталь/бронза ОЦС 5-5-2,5 при давлении 6,5 МПа и скорости скольжения от 0,24 м/с. Магнитное поле на дорожке трения создавалось постоянными магнитами с высокой термостабильностью свойств, выполненными из сплава SmCo_5 . Радиальная составляющая магнитного поля на поверхности диска в зоне трения 80 кА/м, а нормальная составляющая – 10 кА/м. Измерения проводились в условиях, когда весь узел с образцами был залит большим объемом магнитного масла для исключения влияния некоторого перераспределения масла на поверхности в магнитном поле. Для исследований влияния магнитного поля на трение и изнашивание поверхностей выбрана немагнитная жидкая смазочная среда, содержащая инактивное вазелиновое масло и олеиновую кислоту, и для сравнения магнитная жидкость, также содержащая вазелиновое масло и нанодисперсные частицы магнетита, стабилизированные олеиновой кислотой.

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 (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, измерялась 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 У10А с микротвердостью $H_f = 9,5$ ГПа, поверхность которых полировали до $R_a = 0,012$ мкм и после обработки тщательно промывали. Для создания условий, аналогичных реальному узлу трения, в котором магнитное масло удерживалось в зоне фрикционного контакта градиентным магнитным полем, и определения степени влияния магнитного поля при экспериментах использовался компактный снимаемый на время измерений постоянный магнит. Схема магнитной цепи позволила создавать на поверхности пластинки градиентное магнитное поле величиной $8 \cdot 10^6$ А/м², которое характерно для реального узла трения. Для устранения влияния магнитного поля на индентор и измерительную систему прибора магнитообработка стальной пластинки с нанесенным на ее поверхность магнитным маслом проводилась вне предметного столика прибора ПМТ-3.

Одной из физических величин, наиболее полно отражающих энергетическое состояние поверхности трения в зависимости от ее деформации и изменения дефектной структуры, изменения химического и фазового состава, адсорбции и десорбции, окружающих газов и молекул смазки и иных процессов, является работа выхода электрона [8]. Влияние магнитного поля также можно оценить по изменению этой величины.

Работа выхода электронов определялась методом Кельвина–Зисмана. Метод заключается в измерении контактной разности потенциалов (КРП) между исследуемой

поверхностью и поверхностью эталонного образца. Отличительной особенностью метода исследования является бесконтактность, отсутствие каких-либо разрушающих воздействий на опытный образец. Контактная разность потенциалов, возникающая между контактирующими телами в условиях термодинамического равновесия, равна разности работ выхода электрона, отнесенной к заряду электрона. В основе измерителя КРП лежит динамический конденсатор, образованный измеряемым и эталонным образцами, одна из пластин которого колеблется под действием электромеханического вибратора [9]. Абсолютная ошибка измерения работы выхода электрона не превышала 10^{-2} эВ.

Для определения влияния электромагнитных полей на коррозионные процессы был выполнен следующий эксперимент. Цилиндрические образцы, аналогичные используемым в машине трения МТП-М, устанавливались навстречу друг другу торцовыми сторонами с зазором около 1 мм и помещались в вазелиновое магнитное масло, содержащее олеиновую кислоту. Одну пару образцов подключали к источнику электрического тока с напряжением 4,5 В, на другую воздействовали магнитным полем так, чтобы между торцевыми поверхностями поле было неоднородным. Все образцы выдерживались в термостате при $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 30 часов.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Интегральное влияние магнитного поля на трение и износ смазанных поверхностей. Исследования магнитной и немагнитной смазочных сред на основе вазелинового масла показали, что во всем диапазоне доступных значений величины магнитного поля с точностью до 3 % отклонений среднего значения момента трения при включении магнитного поля не происходило, хотя характер его несколько менялся. Повышение объемной температуры до 360 К не привело к каким-либо значимым изменениям силы трения в магнитном поле.

Результаты изучения влияния магнитного поля на изнашивание поверхностей, смазанных модельной магнитной жидкостью с дисперсионной средой из вазелинового масла, магнетита и олеиновой кислоты, приведены на рис. 1.

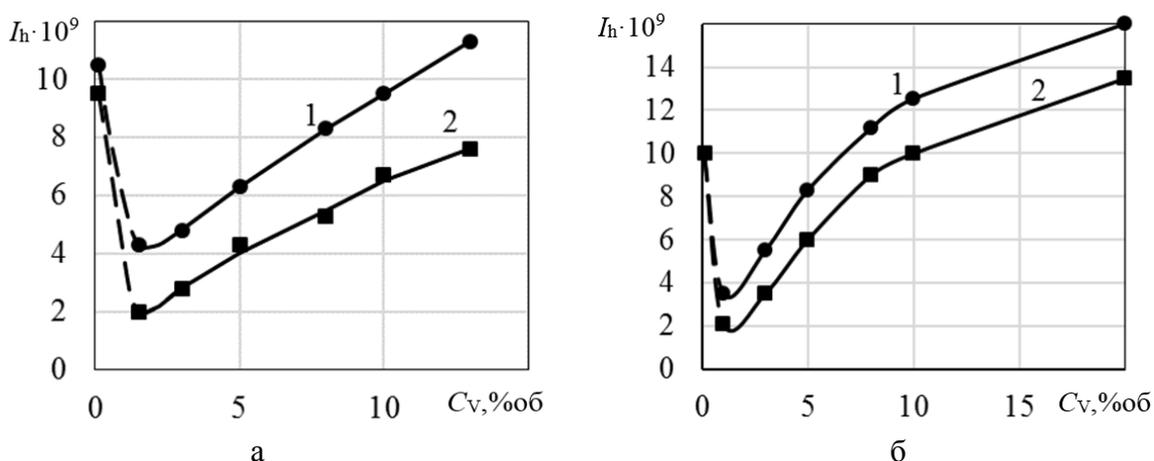


Рис. 1. Зависимость интенсивности изнашивания от объемного содержания магнетита:
а – в магнитном масле; б – олеиновой кислоты в вазелиновом масле;
1 – с магнитным полем; 2 – без магнитного поля

Штриховой линией показано изменение износа при стремлении к нулю содержания Fe_3O_4 (см. рис. 1а) и адсорбтива $\text{C}_{17}\text{H}_{33}\text{COOH}$ (см. рис. 1б). Из графиков

видно, что воздействие магнитного поля на изнашивание несомненно существует, и достаточно значительное: наблюдается увеличение интенсивности изнашивания при увеличении концентрации олеиновой кислоты в растворе и дисперсных частиц, несущих эту жирную кислоту. Максимальный эффект увеличения износа от магнитного поля возрастает по мере увеличения олеиновой кислоты и наночастиц и достигает соответственно примерно 15 и 45 %.

Можно предположить следующий механизм процессов, протекающих на взаимодействующих поверхностях в зоне трения в присутствии магнитного поля. Дисперсные частицы магнитных масел покрыты сольватным слоем, состоящим из адсорбированных молекул поверхностно активного вещества (ПАВ). В процессе уплотнения дисперсных частиц под действием магнитного поля возрастает их удельная поверхность, то есть поверхность, отнесенная к единице объема масла, а концентрация молекул ПАВ в растворе остается прежней. Происходит нарушение кинетического равновесия между процессом десорбции молекул частиц ПАВ с поверхности и их адсорбцией из раствора.

Скорость десорбции превышает скорость адсорбции. Переход к равновесию этих процессов, по всей вероятности, должен сопровождаться увеличением концентрации ПАВ в растворе. В таком случае, если область с повышенной концентрацией частиц находится около поверхности трения, то следует ожидать ускорения формирования на ней граничных смазочных слоев из молекул ПАВ по сравнению с тем, когда магнитное поле отсутствует.

Приповерхностное увеличение концентрации олеиновой кислоты в магнитном поле, по-видимому, приводит к увеличению износа материалов (см. рис. 1б). Аналогичные результаты получаются при искусственном увеличении концентрации олеиновой кислоты в чистом вазелиновом масле.

Управление движением магнитной жидкости по поверхности трения.

Другое действие поля на поверхности, смазанной магнитной жидкостью, имеет чисто механическую природу и проявляется за счет того, что поле может существенным образом изменить скорость растекания (или натекания) масла на поверхности. Движение жидкости вдоль поверхности происходит под действием магнитостатических сил в неоднородном магнитном поле. По существу, магнитное поле стимулирует регенерацию и сохранение смазочной пленки на поверхности трения. Активация скорости растекания магнитным полем позволяет повысить характеристики узлов трения, работающих при смазке лимитированными дозами масла. Так, например, только за счет ускорения натекания масла на дорожку трения в используемой установке получено снижение силы трения до 25 %.

Эффект пластифицирования поверхности в магнитном поле. Изучалось влияние магнитного поля на изменение микротвердости в результате пластифицирования поверхности (эффекта Ребиндера [10]) и на скорость формирования адсорбционных слоев на поверхности трения. Непосредственное влияние магнитного поля на скорость формирования адсорбционных слоев на поверхности твердых тел можно оценить по временной зависимости пластифицирования поверхности, которая проявляется в понижении сопротивления деформации поверхности в адсорбционно-активной среде. Механизм пластифицирования заключается в том, что уменьшение поверхностной энергии твердого тела после поглощения ею адсорбтива существенно облегчает зарождение и перемещение приповерхностных винтовых дислокаций, отвечающих за пластическое течение материала.

Полученные данные по динамике изменения микротвердости приведены на рис. 2. Эффект пластифицирования протекает достаточно продолжительно в течение

1...2 часов. Наиболее быстро твердость поверхности уменьшается в начальные 20...40 мин после нанесения масла. Из рис. 2 видно, что пластифицирование поверхности протекает быстрее при наличии градиентного магнитного поля. Опыты, проведенные с немагнитным маслом, убеждают в том, что изменение микротвердости не обусловлено влиянием поля на свойства стали У10А. Пластифицирование поверхности способствует уменьшению механической (деформационной) составляющей силы трения и особенно сильно при высоких контактных давлениях.

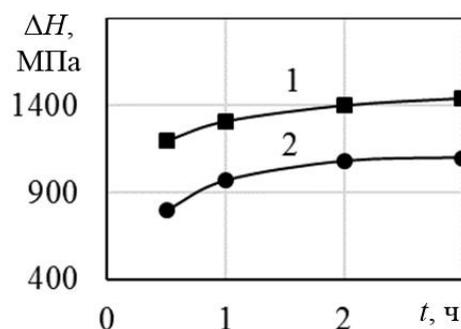


Рис. 2. Динамика изменения микротвердости после нанесения магнитного масла:
1 – с магнитным полем; 2 – без магнитного поля

Оценка влияния магнитного поля на энергетическое состояние взаимодействующих материалов. Одной из доминирующих физических характеристик поверхностей, в значительной мере предопределяющих их фрикционные свойства, является работа выхода электронов. Величина работы выхода зависит от структуры материала и энергетического состояния поверхности. Магнитное поле несколько меняет энергетический спектр электронов, что дополнительно может повлиять на энергию взаимодействия адсорбированных молекул с поверхностью. Из-за перераспределения электронов вблизи поверхности Ферми в магнитном поле и изменения параметров двойного электрического слоя на поверхности работа выхода может измениться, но величину эффекта оценить теоретически сложно. Гипотетически к изменению работы выхода электронов могут привести и микропластические деформации в поверхностном слое, вызванные магнитофрикционными напряжениями.

Для того чтобы проверить, как это скажется на работе выхода, были проведены измерения на поверхностях различных по механическим и магнитным свойствам конструкционных материалов, покрытых тонким (~10 мкм) слоем магнитного или немагнитного масла. В результате исследований никаких статистически достоверных изменений работы выхода в поле напряженностью до $2 \cdot 10^5$ А/м обнаружено не было. Возможно, что достоверные изменения работы выхода электронов происходят, но их величина меньше приборной ошибки измерений в 10 мэВ.

Влияние электромагнитных полей на коррозионные процессы. При смазывании магнитными маслами возможна коррозия металлов пар трения, которая определяется развитием как химических, так и электрохимических процессов. Для большинства магнитных жидкостей стабилизатором дисперсных частиц служат органические кислоты, и наиболее часто для этого используют олеиновую кислоту. Химическая коррозия заключается во взаимодействии их с металлами, приводящем к образованию солей этих кислот. В то же время в литературе [11] отмечается активирующее влияние механических напряжений в поверхностных слоях на коррозионные процессы. Аналогичное влияние могут вызвать магнитофрикционные напряжения, возникающие в материалах при трении под воздействием магнитного поля.

Технология приготовления магнитных масел не исключает попадания в их состав воды, растворения различных газов. Спектральными методами установлено содержание воды в магнитном масле на основе ПЭС-5 до 0,5 %. Поэтому в трибосопряжениях возможно протекание электрохимической коррозии.

Влияние магнитного поля на этот процесс может проявиться косвенно. Накладываемые на пару трения поля не являются однородными, поэтому при относительном движении одного из электропроводящих элементов возникают индукционные токи, которые могут протекать через фрикционный контакт и стимулировать электрокоррозию. В используемой машине трения МТП-М существование таких токов было подтверждено осциллографическими исследованиями. Измеренное значение ЭДС индукции соответствовало расчетным значениям и достигало нескольких милливольт.

На рис. 3 приведены микрофотографии поверхности исследуемых образцов с нерезким из-за коррозии следом от внедрения геометрически правильной пирамиды Виккерса.

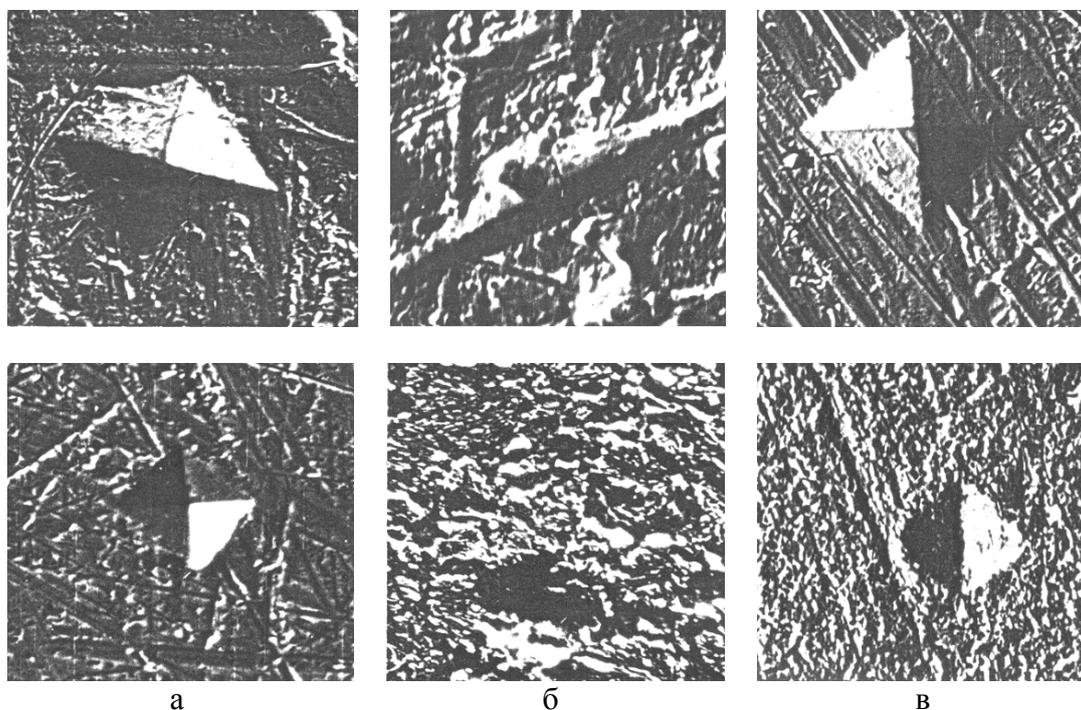


Рис. 3. Изображения поверхности металлов (верхний ряд – бронза, нижний – сталь) после взаимодействия с немагнитным и магнитным вазелиновым маслом:
а – без воздействия полей; б – после воздействия электрического поля;
в – после воздействия магнитного поля

Сравнение рисунков показывает, что в присутствии электрических и магнитных полей коррозия протекает интенсивнее, причем влияние электрического поля значительно существеннее. Это проявляется в том, что след от пирамиды размывается, поверхность становится более рыхлой и следы предварительной механической обработки на притирочном станке исчезают.

В электрическом поле коррозионные процессы интенсивно протекают как на поверхности цветного сплава, так и на поверхности стали (см. рис. 3). Согласно современным представлениям [12], электрический ток активирует поверхность, в частности, облегчает выход дислокаций на поверхность. В самом деле, изоляция

пальчиковых образцов для разрыва электрической цепи индукционного тока приводила к уменьшению износа на уровне 5...7 %.

В магнитном поле (см. рис. 3) коррозии более сильно подвержена поверхность стали. Наиболее вероятно это связано с тем, что в намагниченной стали возникают дополнительные микронапряжения в поверхностном слое, вызванные магнитострикционной деформацией.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Влияние магнитного поля на процессы трения поверхностей, смазанных магнитным маслом, может быть многообразным. Значение всех магнитных эффектов для трения неодинаково, но и абсолютизировать какие-либо из них недопустимо, поскольку степень их влияния зависит от сочетания многих факторов, определяемых условиями трения.

При выполнении проектирования магнитожидкостных узлов трения следует уделить особое внимание учету следующих особенностей трения в присутствии магнитного поля. Магнитное поле изменяет агрегативную устойчивость магнитных жидкостей и стимулирует образование крупных (в диаметре до нескольких микрометров) агломератов из магнитных частиц, которые вызывают абразивное разрушение поверхности и ухудшают ее микрогеометрию. Повышенная концентрация стабилизированных дисперсных частиц около зоны трения в присутствии магнитного поля приводит к возрастанию концентрации поверхностно-активных молекул, вступающих в химическое взаимодействие с материалом поверхности и вызывающих ее коррозионное разрушение. Магнитострикционные микронапряжения в поверхностном слое интенсифицируют этот процесс. При трении в магнитном поле трудно избежать появления индукционных электрических токов, протекающих через контакт, которые также способствуют коррозионному разрушению поверхностей трения.

В дальнейшем следовало бы уделить внимание такому несомненно интересному вопросу, как прямое и косвенное влияние магнитного поля на эффект адсорбционного понижения прочности поверхности трения (эффект Ребиндера).

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 17-08-00614).

ЛИТЕРАТУРА

1. 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.
2. Болотов А.Н., Хренов В.Л. Триботехника магнитопассивных опор скольжения: монография. Тверь: ТвГТУ. 2008. 124 с.
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. Магнитное масло для узлов трения, работающих при граничной смазке. *Трение и смазка в машинах и механизмах*. 2011. № 9. С. 38–41.

6. Болотов А.Н., Бурдо Г.Б., Новиков В.В., Новикова О.О. Технологические методы повышения смазочного действия нанодисперсных магнитных масел. *Сборка в машиностроении, приборостроении*. 2017. Т. 18. № 8 (205). С. 361–365.
7. 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.
8. Жарин А.Л. Метод контактной разности потенциалов и его применение в трибологии. Минск: Бестпринт. 1996. 235 с.
9. Пантелеев К.В., Микитевич В.А., Жарин А.Л. Построение измерителей контактной разности потенциалов. *Приборы и методы измерений*. 2016. Т. 7. № 1. С. 7–15.
10. Щукин Е.Д. Влияние активной среды на механическую устойчивость и повреждаемость поверхности твердого тела. *Вестник МГУ. Сер. 2. Химия*. 2012. Т. 53. № 1. С. 50–72.
11. Хайнике Г. Трибохимия. М.: Мир. 1987. 282 с.
12. Кончиц В.В., Мешков В.В., Мышкин Н.К. Триботехника электрических контактов. Минск: Наука и техника. 1986. 256 с.

INFLUENCE OF MAGNETIC FIELD ON SURFACE EFFECTS WHEN A MAGNETIC FLUID LUBRICANT

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 the results of studies of the influence of a magnetic field on surface effects due to friction in the presence of magnetic lubricants. A significant effect of the magnetic field on the triboparameters of friction units, manifested in an increase in the wear rate in its presence, in particular due to an increase in the concentration of oleic acid in solution, has been established. Here was found a method to improve the characteristics of friction units operating when lubricating in limited doses of magnetic oil by activating the speed of its spreading by a magnetic field. It is shown that the magnetic field contributes to the plasticization of the interacting surfaces, which leads to a decrease in the mechanical (deformation) component of the friction force, and is particularly pronounced at high contact pressures. The influence of a magnetic field on the energy state of materials of friction surfaces is estimated. It is established that the presence of a magnetic field leads to an increase in the concentration of surface-active molecules that enter into chemical interaction with the material of friction surfaces, and accelerates their corrosion destruction.

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

ACKNOWLEDGMENTS

This work was financially supported by the Russian Foundation for Basic Research,
project 17-08-00614.

REFERENCES

1. 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).
2. Bolotov A.N., Hrenov V.L. Tribotekhnika magnetopassivnyh opor skol'zheniya: monografiya [Tribotekhnika of magnetopassive bearing parts of slippage Is lousy: monograph]. Tver: TSTU. 2008. 124 p.
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. 5–9. (In Russian).
5. Bolotov A.N., Novikov V.V., Novikova O.O. Magnetic oil for the frictional units working at boundary lubricant. *Trenie i smazka v mashinah i mekhanizmah*. 2011. No 9, pp. 38–41. (In Russian).
6. Bolotov A.N., Burdo G.B., Novikov V.V., Novikova O.O. Technological methods of increase in lubricant effect of nanodisperse magnetic oils. *Sborka v mashinostroenii, priborostroenii*. 2017. V. 18. No 8 (205), pp. 361–365. (In Russian).
7. 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).
8. Zharin A.L. Metod kontaktnoj raznosti potencialov i ego primenenie v tribologii. [Method of contact potential difference and its application in tribology]. Minsk: Bestprint. 1996. 235 p.
9. Pantelev K.V., Mikitevich V.A., Zharin A.L. Creation of measuring instruments of contact potential difference. *Pribory i metody izmerenij*. 2016. T. 7. No 1, pp. 7–15. (In Russian).
10. Schukin E.D. Influence of the active environment on mechanical stability and damageability of surface of solid. *Vestnik MGU. Ser. 2. Himiya*. 2012. T. 53. No 1, pp. 50–72. (In Russian).
11. Haynike G. Tribokhimiya [Tribokhimiya]. Moscow: World. 1987. 282 p.
12. Konchits V.V., Meshkov V.V., Myshkin N.K. Tribotekhnika ehlektricheskikh kontaktov [Tribotekhnika of electric contacts]. Minsk: Science and technology. 1986. 256 p.

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ МЕХАНОВОДОРОДНОЙ ОБРАБОТКИ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ

Ю.Б. ЕГОРОВА¹, д-р техн. наук, Л.В. ДАВЫДЕНКО², канд. техн. наук,
Е.Н. ЕГОРОВ¹, канд. техн. наук, С.Б. БЕЛОВА¹, канд. техн. наук

¹ Ступинский филиал МАИ, 142800, г. Ступино, Московская область,
ул. Пристанционная, 4, e-mail: egorova_mati@mail.ru

² Московский политехнический университет, 107023, г. Москва,
ул. Большая Семеновская, 38, e-mail: mami-davidenko@mail.ru

Обобщены закономерности влияния водорода на обрабатываемость титановых сплавов резанием. В определенном интервале концентраций водорода и режимов резания наблюдается снижение температуры в зоне резания, уменьшение сил резания, повышение стойкости инструмента. Обоснованы основные принципы механоводородной обработки с учетом того, что эффективность механической обработки титановых сплавов с использованием обратимого легирования водородом зависит от содержания водорода, температуры наводороживания и режимов резания. На основе полученных результатов обоснованы рациональные режимы механоводородной обработки титановых сплавов, включающей наводороживание заготовок, механическую обработку, вакуумный отжиг готовых деталей. Для дальнейшей разработки предложены технологические процессы обработки титановых сплавов с использованием всех преимуществ обратимого легирования водородом. Для сплавов с исходной грубой пластинчатой структурой наиболее целесообразна технология механоводородной обработки по схеме: наводороживание сплава до определенной концентрации + дополнительная термоводородная обработка, обеспечивающая преобразование пластинчатой структуры в глобулярную + черновая механическая обработка + вакуумный отжиг + чистовая механическая обработка.

Ключевые слова: титановые сплавы, водород, механическая обработка, обратимое легирование водородом, водородная технология, механоводородная обработка, термоводородная обработка.

ВВЕДЕНИЕ

Титановые сплавы вследствие высокой прочности, коррозионной стойкости и небольшой плотности находят широкое применение прежде всего в авиации, ракетно- и кораблестроении [1]. Вместе с тем в других отраслях промышленности, таких как автомобилестроение, медицинское приборостроение, их применение довольно ограничено. Это связано с высокой стоимостью производства титановых изделий, что не в последнюю очередь обусловлено трудностью и дороговизной их механической обработки. За годы исследований обрабатываемости резанием титана и его сплавов были разработаны различные способы повышения эффективности их механической обработки [2–11].

Одним из принципиально новых приемов, позволяющих повысить технологичность титановых сплавов при обработке резанием, является обратимое легирование их водородом, которое легло в основу механоводородной обработки (МВО) [12, 13]. Механоводородная обработка титановых сплавов включает в себя: а) наводороживающий отжиг; б) механическую обработку; в) вакуумный отжиг.

Для экспериментальных результатов по влиянию водорода на обрабатываемость титановых сплавов резанием характерны следующие общие закономерности [12–22]:

1. В определенном интервале концентраций водорода в обрабатываемом материале происходит снижение усилий резания, повышение стойкости режущего инструмента, в ряде случаев наблюдается снижение температуры в зоне резания.

2. Наибольший эффект благоприятного влияния водорода соответствует определенным концентрациям водорода, зависящим от состава сплава.

3. Повышение температуры наводороживающего отжига с 750 до 850 °С приводит к ухудшению обрабатываемости титановых сплавов резанием.

4. Понижение скорости, подачи и глубины резания, а также применение дополнительного охлаждения зоны резания усиливают эффект благоприятного влияния водорода на обрабатываемость титановых сплавов резанием.

5. С увеличением содержания водорода стружка становится более хрупкой, а для технического титана и α -сплавов наводороживание и термоциклическая обработка обрабатываемого материала приводят к дроблению стружки.

В отличие от других способов улучшения обрабатываемости резанием титановых сплавов, легирование водородом можно эффективно использовать для улучшения технологичности не только при механической обработке, но и на других стадиях технологического процесса [12]. Это дает возможность разработать сквозную водородную технологию (ВТ) титановых сплавов, которая начинается с введения водорода в слиток с тем, чтобы использовать все положительные аспекты легирования водородом: пластическую деформацию с использованием водородного пластифицирования, термоводородную обработку, улучшение условий диффузионной сварки, улучшение обрабатываемости резанием при механической обработке, утилизацию отходов и т. п.

В данной статье на основе обобщения экспериментальных исследований рассмотрены перспективы развития механоводородной обработки и внедрения сквозных технологических процессов с использованием обратимого легирования водородом для производства изделий из титановых сплавов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве объектов исследования использовали горячекатаные прутки титановых сплавов различных классов: технического титана ВТ1-0, α -сплавов ВТ5-1, ВТ5Л, псевдо- α -сплавов ВТ20, ВТ20Л, α + β -сплавов ВТ6, ВТ8, ВТ25, ВТ3-1, ВТ23. Образцы диаметром 40 мм и длиной 200 мм подвергали наводороживающему отжигу при температуре 800 °С до концентраций водорода 0,1...0,8 % (по массе). В исходном состоянии содержание водорода составляло 0,0045...0,005 %.

В качестве режущего инструмента использовали проходные резцы с напайными пластинами быстрорежущей стали Р18 и механическим креплением четырехгранных пластин из твердых сплавов марок ВК8 и ВТ6ОМ. Пластины перед экспериментами подвергались входному контролю на отсутствие сколов, трещин, раковин на режущих поверхностях. Для исключения влияния материала пластин в пределах партии исходная и три наводороженных заготовки точили одной четырехгранной пластиной.

Для того чтобы обеспечить достоверность и воспроизводимость результатов стойкостных испытаний, сильно подверженных влиянию многих случайных факторов (в частности, химического состава пластины и ее качества, отклонения от геометрических параметров резца, жесткости технологической системы и т. п.), были разработаны специальные планы проведения экспериментов. При одном режиме резания каждый образец точили не менее трех раз различными пластинами. Одной

четырёхгранной пластиной точили четыре различные заготовки. Режимы резания при продольном точении с применением смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ) и без СОЖ были следующими: скорость резания $V = 25 \dots 100$ м/мин, подача $S = 0,078 \dots 0,2$ мм/об, глубина резания $t = 0,5 \dots 1,0$ мм. В процессе экспериментов измеряли износ резца по задней поверхности h_z , стойкость резца T при износе 0,3 мм, удельную размерную стойкость $T_{ур}$, составляющие силы резания (P_x , P_y , P_z), температуру в зоне резания θ_p , °С.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Благоприятное влияние водорода на обрабатываемость резанием было обнаружено как для титана, так и для всех исследованных сплавов. На рис. 1 для примера приведена зависимость удельной размерной стойкости резцов ВК8 и Р18 от содержания водорода в сплаве ВТ6 при точении по режиму: $V = 60$ м/мин, $S = 0,21$ мм/об, $t = 1,0$ мм. Легирование водородом приводит к улучшению обрабатываемости резанием при концентрациях более 0,2 % (масс.), при этом наибольшая стойкость инструмента наблюдается при точении сплава с содержанием водорода $\sim 0,4$ % (масс.).

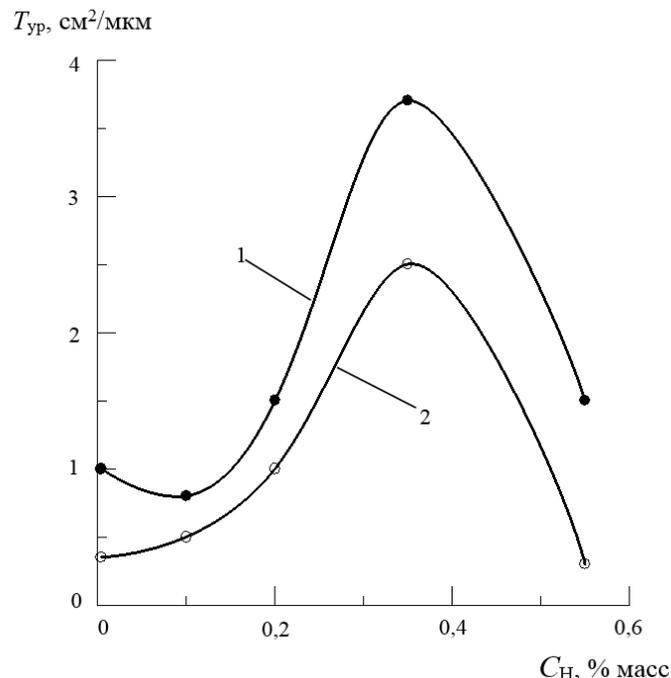


Рис. 1. Зависимость от содержания водорода в сплаве ВТ6 удельной размерной стойкости резцов: 1 – ВК8; 2 – Р18. Охлаждение СОЖ

На рис. 2 представлены результаты стойкостных испытаний резца ВК8 при точении образцов сплава ВТ6 с содержанием водорода 0,004 и 0,35 % (масс.) водорода. Режимы резания: $S = 0,15$ мм/об, $t = 0,5$ мм (охлаждение СОЖ). С увеличением скорости резания и, соответственно, температуры в зоне резания положительное влияние водорода уменьшается, при скоростях резания более 90 м/мин обрабатываемость наводороженных образцов становится хуже исходных. При точении образцов без СОЖ положительное влияние водорода наблюдается при меньших скоростях резания. Так, скорость резания, при которой перестает наблюдаться обусловленное водородом улучшение обрабатываемости резанием, снижается с

90 м/мин при точении с СОЖ до 80 м/мин при точении без СОЖ. При скорости резания $V = 80$ м/мин при точении сплава ВТ6 с подачей $S = 0,15$ мм/об и глубиной резания $t = 0,5$ мм без СОЖ увеличение содержания водорода приводит к ухудшению обрабатываемости резанием по всем параметрам, при этом температура в зоне резания возрастает с 900 до 970 °С (табл. 1).

Таблица 1. Характеристики обрабатываемости резанием сплава ВТ6 с разным содержанием водорода ($V = 80$ м/мин, $S = 0,15$ мм/об, $t = 0,5$ мм)

$C_H, \%$ масс.	$T^*, \text{ мин}$		$\theta_p, \text{ }^\circ\text{С}$		$P_x, \text{ Н}$		$P_y, \text{ Н}$		$P_z, \text{ Н}$	
	Без СОЖ	СОЖ	Без СОЖ	СОЖ	Без СОЖ	СОЖ	Без СОЖ	СОЖ	Без СОЖ	СОЖ
0,004	9,5	12,2	905	878	225	205	304	292	422	416
0,1	6,1	10,0	925	900	225	210	336	303	453	421
0,2	3,6	15,5	950	835	225	210	352	301	454	413
0,3	8,5	21,5	935	785	245	202	352	285	482	402
0,5	6,5	12,5	955	870	275	205	352	283	483	401
0,8	2,4	7,2	968	885	30	215	432	325	533	450

Примечание: * – при износе резца ВК8 по задней грани $h_3 = 0,3$ мм.

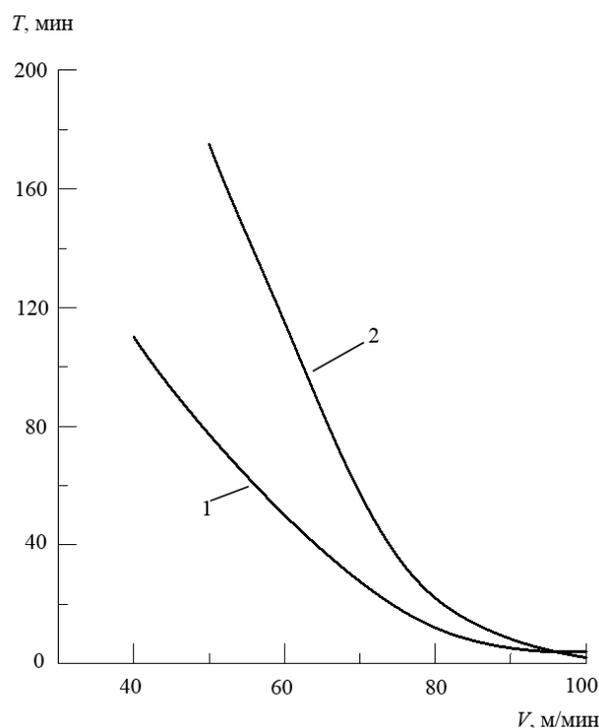


Рис. 2. Зависимость стойкости резца ВК8 от скорости резания при точении сплава ВТ6 с содержанием водорода, (% масс.): 1 – 0,004; 2 – 0,35. Охлаждение СОЖ

Охлаждение СОЖ сопровождается снижением температуры в зоне резания на 100...150 °С в зависимости от содержания водорода в сплаве, причем наименьшая температура и наилучшие характеристики обрабатываемости резанием наблюдаются у сплава с содержанием водорода 0,3 % (масс.).

Благоприятное влияние СОЖ обусловлено, по-видимому, тем, что в зоне резания температура снижается до тех значений, при которых эффекты МВО проявляются в более полной форме. В соответствии с механизмами, которые описаны в

работах [12, 13], повышение температуры в зоне резания свыше 900 °С приводит к ослаблению положительного влияния водорода на обрабатываемость резанием титановых сплавов из-за уменьшения всех благоприятных в технологическом отношении водородных эффектов. При температурах β -области благоприятного влияния водорода на технологические свойства титана и его сплавов не наблюдается. Так, в частности, вместо разупрочнения наблюдается обусловленное водородом растворное упрочнение.

Оптимальные концентрации водорода, при которых эффект механоводородной обработки наиболее значителен, различны для разных сплавов (табл. 2). Наиболее высокая эффективность МВО наблюдается для $\alpha+\beta$ -титановых сплавов с коэффициентом β -стабилизации $k_\beta = 0,3 \dots 0,6$.

Таблица 2. Влияние водорода на характеристики обрабатываемости титановых сплавов резанием ($V = 60$ м/мин; $S = 0,2$ мм/об; $t = 1,0$ мм; ВК8; без СОЖ)

Сплав	k_β	Оптимальные концентрации водорода, % (масс.)	Изменение характеристик обрабатываемости наводороженного металла по сравнению с исходным		
			Снижение температуры в зоне резания, °С	Уменьшение силы резания P_z , число раз	Повышение $T_{ур}$, число раз
BT1-0	0	0,1...0,3	100...150	1,6...1,7	3...3,5
BT5-1	0	0,45...0,55	50	1,1	2...2,5
BT20	0,18	0,3...0,4	Не измеряли	1,2	3,5
BT6	0,29	0,35...0,45	50...70	1,4	7...8
BT8	0,3	0,7...0,8	Не изменяется	1,2	4...5
BT25	0,39	0,15...0,2	Не изменяется	1,2	8...10
		0,6...0,7		1,1	8...10
BT3-1	0,6	0,3...0,5	50...70	1,4	8...12
BT23	0,66	0,15...0,45	Не изменяется	1,1	1,5...2,0

На основе статистического анализа экспериментальных данных были получены формулы для расчета стойкости резцов с механическим креплением четырехгранных пластин ВК8 и скорости резания при чистовом и получистовом точении различных титановых сплавов с исходным и оптимальным для резания содержанием водорода:

$$\text{действующая технология: } T = \frac{C_T}{V^{2,7} \cdot S^{2,4} \cdot t^{2,3}}, \quad V = \frac{C_V}{T^{0,37} \cdot S^{0,89} \cdot t^{0,85}}; \quad (1)$$

$$\text{МВО: } T = \frac{C_T}{V^{3,2} \cdot S^{2,6} \cdot t^{3,2}}, \quad V = \frac{C_V}{T^{0,31} \cdot S^{0,82} \cdot t^{1,1}}. \quad (2)$$

Значения коэффициентов C_T и C_V для различных титановых сплавов приведены в табл. 3. Соотношения (1) и (2) целесообразно применять при скорости резания $V = 40 \dots 100$ м/мин, подаче $S = 0,21 \dots 0,35$ мм/об и глубине резания $t = 0,5 \dots 1,0$ мм. Из анализа соотношений (1) и (2) следует, что, например, для наводороженного сплава BT6 скорость резания можно повысить в 1,5...2 раза при постоянной подаче и глубине резания или при сохранении постоянной скорости можно проводить механическую обработку при большей подаче и глубине резания.

При назначении режимов МВО необходимо учитывать, что температура в зоне резания не должна превышать 900 °С. Среднюю температуру контактных поверхностей

при точении титановых сплавов с исходным содержанием водорода можно определить по регрессионной формуле

$$\theta_p = C_0 V^{0,39} S^{0,27} t^{0,1}, \quad (3)$$

где C_0 – константа, зависящая от марки сплава (табл. 4). Легирование титановых сплавов водородом приводит в среднем к снижению температуры в зоне резания на 50 °С, а дополнительное охлаждение зоны резания сжатым воздухом или СОЖ уменьшает температуру в среднем на 50...70 и 90...120 °С соответственно.

Таблица 3. Коэффициенты в уравнениях (1), (2) для различных марок титановых сплавов

Сплав	Действующая технология		МВО	
	C_T	C_V	C_T	C_V
BT1-0	103466	72	1044060	73
BT5-1	24142	42	299463	50
BT20	15923	36	356488	53
BT6	14757	35	448765	57
BT8	14194	34,5	271722	48
BT25	13646	34	236457	46
BT3-1	12589	33	410500	55
BT23	9733	30	98356	35

Таблица 4. Значения константы C_0 для различных марок титановых сплавов

Сплав	BT1-0	BT5-1	BT20	BT6	BT8	BT25	BT3-1	BT23
C_0	240	260	260	265	265	270	270	290

На рис. 3 приведены принципиальные технологические схемы изготовления деталей из титановых сплавов: как существующая (I), так и предлагаемые (II–V) с использованием обратимого легирования водородом. В предлагаемых способах (II – самостоятельный процесс МВО; III – сквозная водородная технология, использующая все эффекты обратимого легирования водородом; IV – сквозная водородная технология, использующая МВО и ТВО; V – сквозная водородная технология фасонного литья) предусматривается дополнительная операция (введение водорода). Легирование водородом заготовок из титановых сплавов можно осуществлять непосредственно перед механической обработкой, но более целесообразно проводить наводороживание слитка или полуфабриката для того, чтобы использовать все положительные эффекты водородного легирования (при горячей обработке давлением, при термической обработке, диффузионной сварке, при механической обработке и т. п.).

При разработке сквозных водородных технологий следует учитывать, что частные водородные технологические направления в наибольшей степени проявляются в разных интервалах содержания водорода. Поэтому при разработке сквозных водородных технологий производства конкретных полуфабрикатов и деталей следует ориентироваться не на концентрации водорода, при которых благоприятны в технологическом отношении водородные эффекты максимальны, а на достаточные для достижения нужного результата. При разработке технологических процессов важное значение имеет порядок проведения операций. МВО можно проводить на разных этапах технологического процесса, например, после наводороживающего отжига перед

обработкой давлением, то есть еще на этапе черновой механической обработки слитка (рис. 3, схема 3). После обработки давлением в условиях водородного пластифицирования (ВП) может следовать черновая механическая обработка, затем термоводородная обработка (ТВО) по схемам, приведенным в работах [12, 23, 24]. В том случае, если предусматривается закалка, то черновую или получистовую механическую обработку целесообразно провести после нее, а затем старение (или термоциклическую обработку), чистовую механическую обработку и вакуумный отжиг. При разработке технологических процессов с использованием обратимого легирования водородом можно использовать не все эффекты водородной технологии. Например, в схемах 4 и 5 предлагаются технологические процессы, использующие только МВО и ТВО. Однако завершающей операцией следует предусмотреть чистовую механическую обработку после вакуумного отжига.



Рис. 3. Технологические схемы изготовления деталей из титановых сплавов

Основной технологический недостаток МВО состоит в том, что для каждого сплава благоприятный эффект наблюдается при определенных концентрациях водорода, когда температура в зоне резания оптимальна. В свою очередь, эта температура сильно зависит, с одной стороны, от режимов резания, марки инструмента, геометрии режущей части, величины износа резца, с другой стороны, от марки титанового сплава, его фазового состава и структуры.

В рассмотренных выше исследованиях практически все эксперименты проводили при продольном тчении с помощью проходных резцов с механическим креплением четырехгранных пластин из твердых сплавов ВК8 и ВК6ОМ. При использовании резцов с напайными пластинами и другими геометрическими параметрами режущей части параметры МВО могут измениться.

Как было показано выше, в качестве объектов исследования использовали горячекатаные прутки с грубой пластинчатой структурой. После наводороживания по

исследованным режимам происходило преобразование пластинчатой структуры в глобулярную. Максимальный эффект МВО наблюдается для титановых сплавов с мелкоглобулярной, или тонкопластинчатой структурой [10–13, 25]. Для сплавов с исходной грубой пластинчатой структурой наиболее целесообразна технология МВО по схеме: наводороживание до определенной концентрации + дополнительная ТВО, обеспечивающая преобразование пластинчатой структуры в глобулярную (если это не произошло в процессе наводороживания) + черновая механическая обработка + вакуумный отжиг + чистовая механическая обработка. Возможно, что для сплавов с исходной глобулярной или смешанной структурой эффект МВО может проявляться в меньшей степени или при других концентрациях водорода.

Таким образом, МВО имеет те же недостатки, что и термическая обработка титановых сплавов, которые ограничивают ее широкое применение: строгая регламентация структуры перед термической обработкой или МВО, сильная чувствительность к температурному фактору (температура наводороживающего отжига, температура нагрева под закалку, температура старения, оптимальная температура резания) и скоростям охлаждения, сильная зависимость от колебаний химического состава в пределах ТУ [23, 26].

Для успешного промышленного применения МВО необходимо проведение дальнейших исследований: 1) исследование зависимости режимов МВО от марки инструментального материала и геометрии режущей части; 2) анализ эффективности применения МВО в зависимости от исходной структуры обрабатываемого материала (пластинчатая, глобулярная, смешанная) для различных классов титановых сплавов; 3) исследование влияния предшествующей обработки (ВП + ТВО) на обрабатываемость резанием титановых сплавов и разработка на этой основе технологических рекомендаций производства изделий из титановых сплавов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На основе обобщения закономерностей влияния водорода на обрабатываемость титановых сплавов резанием обоснованы рациональные режимы механоводородной обработки при точении титановых сплавов, включающей наводороживание заготовок, механическую обработку, вакуумный отжиг готовых деталей.

2. Для дальнейшей разработки предложены технологические процессы обработки титановых сплавов с использованием всех преимуществ обратимого легирования водородом.

3. Для сплавов с исходной грубой пластинчатой структурой наиболее целесообразна технология МВО по схеме: наводороживание до определенной концентрации + дополнительная термоводородная обработка, обеспечивающая преобразование пластинчатой структуры в глобулярную + черновая механическая обработка + вакуумный отжиг + чистовая механическая обработка.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ильин А.А., Колачев Б.А., Польшкин И.С. Титановые сплавы. Состав, структура, свойства. Справочник. М.: ВИС–МАТИ. 2009. 520 с.
2. Egorova Yu.B., Skvortsova S.V., Davydenko R.A., Mitropol'skaya N.G. Methods of increasing efficiency of machinability of titanium and titanium alloy. *Inorganic Materials: Applied Research*. 2013. V. 4. № 1. P. 46–51.
3. Егорова Ю.Б., Давыденко Л.В., Бабин С.В., Егоров Е.Н. Достижения в механической обработке титана и его сплавов за 50 лет. *Технология металлов*. 2015. № 10. С. 2–10.

4. Niknam S.E., Khettabi R., Songmene V. Machinability and Machining of Titanium Alloys: A Review. *Machining of Titanium Alloys*. Springer-Verlag. Berlin Heidelberg. 2014. P. 1–30.
5. Khanna N., Sangwan K.S. Machinability study on α/β and β -titanium alloys in different heat treatment conditions. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. 2013. March 1. V. 227. P. 357–361.
6. Баранчиков В.И. Обработка специальных материалов в машиностроении: Справочник. М.: Машиностроение. 2002. 264 с.
7. Баранчиков В.И. и др. Справочник конструктора-инструментальщика. М.: Машиностроение. 2006. 541 с.
8. Панов А.А., Аникин В.В., Бойм Н.Г. и др. Обработка металлов резанием: Справочник технолога; под общ. ред. Панова А.А. М.: Машиностроение. 2004. 784 с.
9. Skvortsova S.V., German M.A., Gurtovaya G.V., Mitropol'skaya N.G. Effect of the structure of a VST2K Titanium alloy on its machinability. *Russian metallurgy (Metally)*. 2016. V. 2016. № 7. P. 649–656.
10. Egorova Yu.B., Davydenko L.V., Egorov E.N., Belova S.B. Influence of Heat Treatment on the Machinability of $\alpha+\beta$ - and near β -Titanium Alloys. *International Review of Mechanical Engineering (IREME)*. 2017. V. 11. № 5. P. 320–325.
11. Егорова Ю.Б., Белова С.Б., Егоров Е.Н., Давыденко Л.В. Повышение эффективности обработки резанием $\alpha+\beta$ - и псевдо- β -титановых сплавов путем термической обработки. *Технология металлов*. 2018. № 9. С. 28–34.
12. Ильин А.А., Колачев Б.А., Носов В.К., Мамонов А.М. Водородная технология титановых сплавов. М.: МИСИС. 2002. 392 с.
13. Егорова Ю.Б., Ильин А.А., Левочкин А.А. Механоводородная обработка как элемент водородной технологии получения деталей из титановых сплавов. *Известия вузов. Цветная металлургия*. 2002. № 3. С. 42–47.
14. Wei W., Xu J., Fu Y., Yang S., Hou H., Wang Y., Li Z. Machinability of hydrogenating titanium alloy TC4. *Nanjing Hangkong Hangtian Daxue Xuebao*. 2009. Vol. 41. № 5. P. 633–638.
15. Wei W.-H., Xu J.-H., Fu Y.-C., Yang S.-B. Influence of hydrogen contents of Ti-6Al-4V alloy on cutting force and temperature. *Key Engineering Materials*. 2010. V. 419–420. P. 789–792.
16. Wei W., Xu J., Fu Y., Hou H., Li Z. Optimization of hydrogenation process and hydrogenation concentration in improving titanium alloy machinability. *Zhongguo Jixie Gongcheng*. 2010. V. 21. № 2. P. 196–201.
17. Hua X.-Z., Peng X.-Y., Zhou X.-L., Zou A.-H., Cui X. Effect of thermohydrogen treatment on machinability of TC4 Titanium alloy. *Cailiao Rechuli Xuebao*. 2011. V. 32. № 4. P. 43–46.
18. Hua X.Z., Peng X.Y., Zhou X.L., Chen Q.J. Influence of hydrogen on machinability of BT25Y alloy. *Advanced Materials Research*. 2011. V. 148–149. P. 385–388.
19. Yang S.B., Xu J., Fu Y., Wei W. Finite element modeling of machining of hydrogenated Ti-6Al-4V alloy. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2012. V. 59. № 1–4. P. 253–261.
20. Wei W., Xu J., Fu Y., Yang S. Tool wear in turning of Titanium alloy after thermohydrogen treatment. *Chinese Journal of Mechanical Engineering (English Edition)*. 2012. V. 25. № 4. P. 776–780.
21. Yang S., G. Zhu, J. Xu, Y. Fu. Tool wear prediction on machining hydrogenated Titanium alloy Ti6Al4V with uncoated carbide tools. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2013. V. 68. № 1–4. P. 673–682.

22. Yang S.B., Zhu G.H., Xu J.H., Fu Y.C. Experimental study in high efficiency milling of hydrogenated Ti6Al4V alloy. *Materials Science Forum*. 2014. V. 770. P. 179–182.

23. Ильин А.А. Механизм и кинетика фазовых и структурных превращений в титановых сплавах. М.: Наука. 1994. 304 с.

24. Колачев Б.А., Ильин А.А., Носов В.К., Мамонов А.М. Достижения водородной технологии титановых сплавов. *Технология легких сплавов*. 2007. № 3. С. 10–26.

25. Egorova Yu.B., Il'in A.A., Kolachev B.A., Nosov V.K., Mamonov A.M. Effect of the structure on the cutability of titanium alloys. *Metal Science and Heat Treatment*. 2003. V. 45. № 3–4. P. 134–139.

26. Полькин И.С. Упрочняющая термическая обработка титановых сплавов. М.: Металлургия. 1984. 96 с.

PROSPECTS FOR THE DEVELOPMENT OF MACHINING HYDROGENATED PROCESSING OF TITANIUM ALLOYS

YU.B. EGOROVA¹, Dr Sci, L.V. DAVYDENKO², Cand Sci,
E.N. EGOROV¹, Cand Sci, S.B. BELOVA¹, Cand Sci

¹ Stupinsky Branch of the MAI, 4, Pristanzionnaya st., 142800 Stupino,
Moscow region, Russia, e-mail: egorova_mati@mail.ru

² Moscow Polytechnic University, 38, Bolshaya Semenovskaya st., 107023 Moscow,
Russia, e-mail: mami-davidenko@mail.ru

Summarizes the regularities of the influence of hydrogen on the machinability of titanium alloys machining. In a certain range of hydrogen concentrations and cutting conditions, there is a decrease in temperature in the cutting zone, a decrease in cutting forces, an increase in tool life. The basic principles of mechanical hydrogen processing are substantiated taking into account that the efficiency of machining titanium alloys using reversible hydrogen doping depends on the hydrogen content, the temperature of hydrogenation and cutting conditions. On the basis of the obtained results rational modes of mechanical-hydrogen processing of titanium alloys, including hydrogenation of billets, mechanical treatment, vacuum annealing of finished parts are substantiated. For further development, the technological processes of processing titanium alloys using all the advantages of reversible hydrogen doping are proposed. For alloys with an initial coarse plate structure, the most appropriate technology is mechanical hydrogen processing according to the scheme: hydrogenation of the alloy to a certain concentration + additional thermal hydrogen treatment, which ensures the transformation of the plate structure into a globular + rough machining + vacuum annealing + finishing machining.

Keywords: titanium alloys, hydrogen, machining, reversible alloying with hydrogen, hydrogen technology, mechano-hydrogen processing, thermo-hydrogen treatment.

REFERENCES

1. Ilyin A.A., Kolachev B.A., Polkin I.S. *Titanovyie splavy. Sostav, struktura, svoystva. Spravochnik*. [Titanium alloys. Composition, structure, properties. Handbook]. М.: VILS – MATI, 2009. 520 p.

2. Egorova Yu.B., Skvortsova S.V., Davydenko R.A., Mitropol'skaya N.G. Methods of increasing efficiency of machinability of titanium and titanium alloy, *Inorganic Materials: Applied Research*. 2013. V. 4. No 1, pp. 46–51.
3. Egorova Yu.B., Davydenko L.V., Babin S.V., Egorov E.N. Achievements in machining of titanium and its alloys for 50 years. *Tekhnologiya metallov*. 2015. No. 10, pp. 2–10. (In Russian).
4. Niknam S.E., Khettabi R., Songmene V. Machinability and Machining of Titanium Alloys: A Review. *Machining of Titanium Alloys*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 2014, pp. 1–30.
5. Khanna N., Sangwan K. S. Machinability study on α/β and β -titanium alloys in different heat treatment conditions / Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: *Journal of Engineering Manufacture*. 2013. March 1. V. 227, pp. 357–361.
6. Baranchikov V.I. *Obrabotka spetsial'nykh materialov v mashinostroyenii: Spravochnik*. [Processing of special materials in mechanical engineering: Handbook.] M.: Mashinostroyeniye. 2002. 264 p.
7. Baranchikov V.I. *Spravochnik konstruktora-instrumental'shchika*. [Reference designer toolmaker.] M.: Mashinostroyeniye. 2006. 541 p.
8. Panov A.A., Anikin V.V., Boym N.G. *Obrabotka metallov rezaniyem: Spravochnik tekhnologa*. [Metal cutting: A Handbook for the technologist]. M.: Mashinostroyeniye. 2004. 784 p.
9. Skvortsova S.V., German M.A., Gurtovaya G.V., Mitropol'skaya N.G. Effect of the structure of a VST2K Titanium alloy on its machinability, *Russian metallurgy (Metally)*. 2016. V. 2016. No 7, pp. 649–656.
10. Egorova Yu.B., Davydenko L.V., Egorov E.N., Belova S.B. Influence of Heat Treatment on the Machinability of $\alpha+\beta$ - and near β -Titanium Alloys, *International Review of Mechanical Engineering (IREME)*. 2017. V. 11. No 5, pp. 320–325.
11. Egorova Yu.B., Belova S.B., Egorov E.N., Davydenko L.V. Improving the efficiency of machining of $\alpha + \beta$ - and pseudo- β -titanium alloys by heat treatment, *Tekhnologiya metallov*. 2018. No 9, pp. 28–34. (In Russian).
12. Il'in A.A., Kolachev B.A., Nosov V.K., Mamonov A.M. *Vodorodnaya tekhnologiya titanovykh splavov*. [Hydrogen technology of titanium alloys]. M.: MISIS. 2002. 392 p.
13. Egorova Yu.B., Il'in A.A., Levochkin A.A. Hydrofluor treatment as an element of hydrogen technology for producing parts from titanium alloys, *Izvestiya VUZov. Tsvetnaya metallurgiya*. 2002. No 3, pp. 42–47. (In Russian).
14. Wei W., Xu J., Fu Y., Yang S., Hou H., Wang Y., Li Z. Machinability of hydrogenating titanium alloy TC4, *Nanjing Hangkong Hangtian Daxue Xuebao*. 2009. V. 41. No 5, pp. 633–638.
15. Wei W.-H., Xu J.-H., Fu Y.-C., Yang S.-B. Influence of hydrogen contents of Ti-6Al-4V alloy on cutting force and temperature, *Key Engineering Materials*. 2010. V. 419–420, pp. 789–792.
16. Wei W., Xu J., Fu Y., Hou H., Li Z. Optimization of hydrogenation process and hydrogenation concentration in improving titanium alloy machinability, *Zhongguo Jixie Gongcheng*. 2010. V. 21. No 2, pp. 196–201.
17. Hua X.-Z., Peng X.-Y., Zhou X.-L., Zou A.-H., Cui X. Effect of thermohydrogen treatment on machinability of TC4 Titanium alloy, *Cailiao Rechuli Xuebao*. 2011. V. 32. No 4, pp. 43–46.
18. Hua X.Z., Peng X.Y., Zhou X.L., Chen Q.J. Influence of hydrogen on machinability of BT25Y alloy, *Advanced Materials Research*. 2011. V. 148–149, pp. 385–388.

19. Yang S.B., Xu J., Fu Y., Wei W. Finite element modeling of machining of hydrogenated Ti-6Al-4V alloy, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2012. V. 59. No 1–4, pp. 253–261.
20. Wei W., Xu J., Fu Y., Yang S. Tool wear in turning of Titanium alloy after thermohydrogen treatment, *Chinese Journal of Mechanical Engineering (English Edition)*. 2012. V. 25. No 4, pp. 776–780.
21. Yang S., G. Zhu, J. Xu, Y. Fu. Tool wear prediction on machining hydrogenated Titanium alloy Ti6Al4V with uncoated carbide tools, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2013. V. 68. No 1–4, pp. 673–682.
22. Yang S.B., Zhu G.H., Xu J.H., Fu Y.C. Experimental study in high efficiency milling of hydrogenated Ti6Al4V alloy, *Materials Science Forum*. 2014. V. 770, pp. 179–182.
23. Il'in A.A. *Mekhanizm i kinetika fazovykh i strukturnykh prevrashcheniy v titanovykh splavakh*. [The mechanism and kinetics of phase and structural transformations in titanium alloys.] M.: Nauka. 1994. 304 p.
24. Kolachev B.A., Il'in A.A., Nosov V.K., Mamonov A.M. Achievements of hydrogen technology of titanium alloys, *Tekhnologiya legkikh splavov*. 2007. No 3, pp. 10–26. (In Russian).
25. Egorova Yu.B., Il'in A.A., Kolachev B.A., Nosov V.K., Mamonov A.M. Effect of the structure on the cutability of titanium alloys, *Metal Science and Heat Treatment*. 2003. V. 45. No 3–4, pp. 134–139.
26. Pol'kin I.S. *Uprochnyayushchaya termicheskaya obrabotka titanovykh splavov*. [Hardening heat treatment of titanium alloys]. M.: Metallurgiya. 1984. 96 p.

МЕХАНИЗИРОВАННЫЙ ПАТРОН ДЛЯ ПЕРЕУСТАНОВКИ ЗАГОТОВКИ С НАРУЖНОЙ РЕЗЬБОЙ

А.П. АРХАРОВ, канд. техн. наук

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

Приведена конструкция кулачкового механизированного патрона, содержащего корпус с кулачками, коническую втулку, размещенную в корпусе с возможностью перемещения вдоль оси патрона от привода, и механизм передачи движения от конической втулки кулачкам. В конической втулке установлена втулка со ступенчатым отверстием, продольными прорезями и шпоночной канавкой. С упомянутой канавкой сопряжена шпонка, установленная в конической втулке. Между дном конической втулки и уступом ступенчатого отверстия размещена пружина. Втулка сопряжена с отверстием конической втулки с возможностью перемещения вдоль оси патрона. На входной части ступенчатого отверстия выполнена резьба, соответствующая резьбе закрепляемого объекта. Предлагаемая конструкция патрона по сравнению с известными обеспечивает закрепление заготовки как за цилиндрическую, так и за резьбовую поверхности. Это расширяет его технологические возможности. Патрон может быть использован на машиностроительных предприятиях при автоматической переустановке заготовок на технологическом оборудовании.

Ключевые слова: автоматизация, переустановка, заготовка, резьба, патрон, деформация, кулачки.

ВВЕДЕНИЕ

В конструкциях различных машин и приборов имеются детали в виде стержней, содержащие резьбу на одном из своих концов и головку разнообразной формы и ограниченных размеров на другом. Такие конструктивные элементы препятствуют обработке подобных деталей на современном технологическом оборудовании, поскольку головки ограниченных размеров не обеспечивают надежного базирования, а использование в качестве базы наружной резьбовой поверхности приводит к деформации резьбы при закреплении. Поэтому для обработки таких деталей на обрабатывающем центре с двумя шпинделями возникает необходимость переустановки заготовки резьбовой поверхностью на противощпиндель, который должен быть оснащен соответствующим патроном.

Анализ литературных источников показал, что существует двухкулачковый самоцентрирующийся клиновой механизированный патрон, содержащий корпус с пазами, накладные кулачки, базирующиеся в пазах корпуса и содержащие клиновые выступы. Кроме того, патрон имеет губки, размещенные на кулачках при помощи шпонок, втулку, расположенную в направляющей корпуса с возможностью осевого перемещения и содержащую клиновые пазы, сопряженные с клиновыми выступами. Закрепление (открепление) заготовки осуществляется с помощью гидравлического или пневматического привода, размещенного на заднем конце полого шпинделя станка и связанного штоком с патроном [1].

Однако известный патрон не предусматривает закрепления детали по наружной резьбовой поверхности из-за смятия резьбы кулачками.

На металлообрабатывающих станках широко используется двухкулачковый клиновой механизированный патрон, содержащий корпус с двумя радиальными пазами, внутри которого с возможностью осевого перемещения размещен толкатель с наклонными клиновыми пазами. Кроме того, в радиальных пазах корпуса размещены ползуны с кулачками и наклонными клиновыми выступами, сопряженными с упомянутыми наклонными клиновыми пазами. Патрон также содержит привод со штоком, связанный с толкателем [2].

Однако указанный патрон не содержит конструктивных элементов, которые позволяли бы закреплять детали по резьбовой поверхности без деформации.

Также известен способ установки детали в двухкулачковый механизированный патрон с переменным движением кулачков [3, 4]. Он включает в себя установку детали на базирующий элемент, установку патрона напротив детали, подвод патрона к базирующему элементу, перемещение кулачков патрона в радиальном направлении на сближение с деталью. В момент касания одного из кулачков с деталью прерывают перемещение этого кулачка, а возобновляют его перемещение при касании другого кулачка с упомянутой деталью. Затем закрепляют деталь одновременно двумя кулачками и отводят патрон с деталью в исходное положение. Однако указанный способ имеет ограниченные технологические возможности, поскольку он неприменим при перезакреплении по резьбовой поверхности ввиду ее деформации при закреплении.

Для переустановки детали с наружной резьбой в механизированный патрон существует способ, приведенный в работе [5]. Способ включает установку и закрепление детали в базирующем элементе, установку патрона с резьбовой разрезной втулкой напротив детали, вращение патрона с упомянутой втулкой и их подвод к базирующему элементу, закрепление детали в патроне, открепление детали в базирующем элементе и отвод патрона. В момент касания втулки с деталью ее перемещение прерывают, а затем возобновляют при совмещении заходов резьбы детали и втулки, навинчивая при этом втулку на резьбу детали, после чего останавливают вращение и перемещение патрона с втулкой. Закрепление детали в патроне осуществляют путем давления его зажимных элементов на втулку.

Однако этот способ не может быть реализован с помощью вышеуказанных патронов ввиду их упомянутых недостатков. Цель настоящей работы – разработка кулачкового механизированного патрона с закреплением детали по наружной резьбовой поверхности.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Известно, что процесс проектирования предполагает применение анализа и синтеза [6]. Для проверки новизны поставленной цели использовался структурный анализ известных на практике, а также из научной литературы и в патентной документации патронов для закрепления заготовок. При разработке нового патрона применен синтез таких элементов, которые в совокупности образуют единое целое, отвечающее критерию оригинальности.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Решение поставленной цели и технический результат достигаются тем, что разработанный патрон содержит корпус с кулачками, коническую втулку, размещенную в корпусе с возможностью перемещения вдоль оси патрона от привода, механизм передачи движения от конической втулки кулачкам. Патрон включает в себя также втулку со ступенчатым отверстием, продольными прорезями и шпоночной канавкой, шпонку, установленную в конической втулке и сопряженную со шпоночной канавкой, и пружину, размещенную в выходной части ступенчатого отверстия и

упирающуюся одним концом в выполненное дно отверстия конической втулки, а другим концом – в уступ ступенчатого отверстия. Кроме того, втулка сопряжена с отверстием конической втулки с возможностью перемещения вдоль оси патрона, а на входной части ступенчатого отверстия выполнена резьба, соответствующая резьбе закрепляемого объекта.

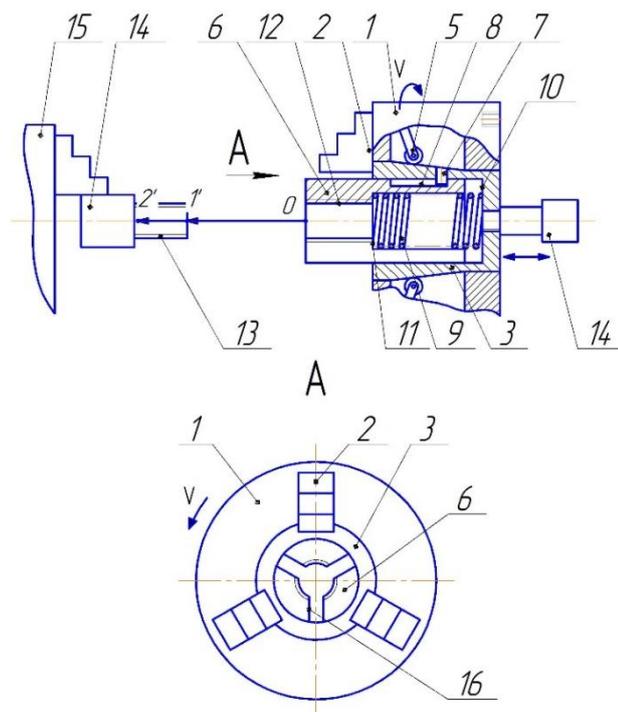
Втулка в конструкции патрона устраняет непосредственный контакт кулачков с резьбой закрепляемого объекта, что исключает деформацию упомянутой резьбы при закреплении. Кроме того, резьба, выполненная на выходной части ступенчатого отверстия и сопряженная с резьбой объекта при закреплении, воспринимает давление кулачков большей своей площадью, что также исключает деформацию резьбы объекта. Подвижное вдоль оси патрона сопряжение втулки с отверстием конической втулки обеспечивает остановку только втулки при касании с объектом, а также компенсирует расхождение между оборотной подачей патрона и ходом резьбы при навинчивании. Пружина, установленная между дном отверстия конической втулки и ступенью ступенчатого отверстия, своим давлением способствует прижатию втулки и началу ее завинчивания на объект при совмещении заходов резьб. Шпонка сопряжена со шпоночной канавкой, передает вращение от корпуса ко втулке в любом ее положении вдоль оси патрона. Продольные прорезы на втулке способствуют деформации ее входной части при давлении кулачков. Тем самым устраняется зазор в резьбовом сопряжении «втулка–объект». Все отмеченные отличительные признаки в совокупности с общими признаками, свойственными приведенному выше двухкулачковому патрону, обеспечивают закрепление патроном объекта за резьбовую поверхность. Кроме того, подвижность втулки вдоль оси патрона позволяет патрону закреплять также объекты за нерезьбовые поверхности, размеры которых в диаметральном направлении превышают номинальный размер резьбы втулки. Это осуществляется за счет того, что втулка после касания объекта не возобновляет свое перемещение, а кулачки патрона закрепляют объект непосредственно по нерезьбовой поверхности.

Таким образом, предлагаемый патрон имеет расширенные технологические возможности за счет закрепления объекта по наружной резьбовой поверхности.

На рисунке показан общий вид патрона. Патрон состоит из корпуса 1 с кулачками 2, конической втулки 3, размещенной в корпусе 1 с возможностью перемещения вдоль оси патрона от привода 4, механизма 5 для передачи перемещения от конической втулки 3 кулачкам 2, втулки 6 со ступенчатым отверстием, сопряженной с отверстием конической втулки 3 с возможностью перемещения вдоль оси патрона. В конической втулке 3 установлена шпонка 7, сопряженная со шпоночной канавкой 8, выполненной на втулке 6. В выходной части ступенчатого отверстия втулки 6 размещена пружина 9, упирающаяся одним концом в выполненное дно 10 отверстия конической втулки 3, а другим концом – в ступень 11 ступенчатого отверстия. На входной части упомянутого отверстия втулки 6 выполнена резьба 12, соответствующая резьбе 13 объекта 14, закрепленного в базирующем элементе 15. На втулке выполнены продольные прорезы 16.

Патрон работает следующим образом. Вращают патрон со скоростью V , а также перемещают его от механизмов станка (на рисунке не показаны) из исходной точки O в направлении к объекту 14. При касании втулки 6 с объектом 14 в точке $1'$ ее движение вдоль оси патрона прерывается, а вращение не останавливается за счет шпонки 7, сопряженной со шпоночной канавкой 8. Но эта остановка движения втулки 6 не препятствует продолжающемуся движению корпуса 1 к объекту 14 за счет подвижной посадки втулки 6 в отверстии конической втулки 3. За счет продолжающегося вращения V патрона и прижатия втулки 6 к торцу объекта 14 пружиной 9 происходит

совмещение заходов резьб 12 и 13, после чего втулка 6 навинчивается на резьбу 13 объекта 14. В точке 2' останавливается перемещение патрона и его вращение. Срабатывает привод 4, который перемещает коническую втулку 3 вдоль оси патрона, а через механизм 5 для передачи перемещения – кулачки 2. Упомянутые кулачки сначала деформируют втулку 6 за счет ее продольных прорезей 16, устраняя при этом зазор между резьбами 12 и 13, а затем закрепляют объект 14 в патроне. Далее открепляют объект 14 в базирующем элементе 15 и отводят патрон с упомянутым объектом в исходное положение.



Механизированный патрон
для переустановки заготовки с наружной резьбой

Таким образом, выполняется переустановка объекта с закреплением его за наружную резьбовую поверхность.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан механизированный кулачковый патрон для закрепления заготовки по наружной резьбовой поверхности. Патрон отвечает критериям новизны и оригинальности конструкции. Он может быть использован на машиностроительных предприятиях при автоматической установке и переустановке деталей на технологическом оборудовании.

ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 24351-80. Патроны токарные самоцентрирующие трех- и двухкулачковые клиновые и рычажно-клиновые. М.: Издательство стандартов. 1993. 11 с.
2. Авторское свидетельство SU 1616791. Двухкулачковый токарный патрон. Вольский М.И. Заявл. 14.01.88. Опубл. 30.12.90. Бюл. № 48.
3. Архаров А.П., Павлов А.В. Способ установки заготовки в двухкулачковом механизированном патроне. *Вестник Тверского государственного технического университета*. 2017. № 1 (31). С. 40–41.

4. Патент РФ 2623549. Способ установки заготовки в двухкулачковом механизированном патроне. Архаров А.П.. Заявл. 26.10.2016. Оpubл. 27.06.2016. Бюл. № 18.
5. Архаров А.П., Лобанов М.А. Способ переустановки детали с наружной резьбой в механизированный патрон. *Актуальные проблемы машиностроения, безопасности и экологии в природопользовании. Материалы IV Международной научно-технической конференции.* В 2 ч. Тверь: Тверской государственный технический университет. 2018. С. 12–15.
6. Хилл П. Наука и искусство проектирования. М.: Мир. 1973. 264 с.

MECHANIZED CHUCK FOR REINSTALLATION OF WORKPIECE WITH MALE THREAD

A.P. ARKHAROV, Cand Sci

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

This is the cam mechanized chuck design. It is consisting of body with cams, tapered bushing located in body and with drive movement along the axis of the chuck ability, and the transmitting mechanism from the tapered bushing to the cams. The tapered bushing has another bushing with step hole, longitudinal grooves and a keyway. A key located at tapered bushing also mates with the keyway. It also has a spring between the bottom of the tapered bushing and the step of the hole. Bushing with a keyway mates the tapered bushing hole with movement along the axis of the chuck ability. The bushing with the step hole has a thread fitting the workpiece thread. The mentioned chuck design provides both cylindrical as thread fastening than the known ones. It expands technological capabilities. The chuck should be operated at engineering enterprises when the automated workpiece reinstallation is needed.

Keywords: automation, reinstallation, workpiece, thread, chuck, deformation, cams.

REFERENCES

1. GOST RF 24351-80. *Patrony tokarnye samocentriruyushchie treh-i dvuhkulachkovye klinovye i rychazhno-klinovye* [Lathe concentric three- and two-cam wedge-type and lever-wedge-type chucks]. Moscow: Izdatel'stvo standartov. 1993. 11 p. (In Russian).
2. Inventor's certificate SU 1616791. *Dvuhkulachkovyj tokarny jpatron* [Lathe two-cam chuck]. Vol'skij M. I. Declared 14.01.1988. Published 30.12.1990. Bulletin No. 48. (In Russian).
3. Arkharov A.P., Pavlov A.V. Method of workpiece installation in two-cam mechanized chuck. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta.* 2017. No 1(31), pp. 40–41. (In Russian).
4. Patent RF 2623549. *Sposob ustanovki zagotovki v dvuhkulachkovom mehanizirovannom patrone* [Method of workpiece installation in two-cam mechanized chuck]. Arkharov A.P. Declared 26.10.2016. Published 27.06.2016. Bulletin No. 18. (In Russian).
5. Arkharov A.P., Lobanov M.A. Method of male thread workpiece reinstallation in mechanized chuck. *Current issues of engineering, safeness and ecology in environmental management. IV-th International Scientific Conference materials in 2 parts.* Tver: TSTU. 2018, pp. 12–15. (In Russian).
6. Hill P. *Nauka i iskusstvo proektirovaniya* [The Science of engineering design]. Moscow: Mir. 1973. 264 p.

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ СИНТЕЗА ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ОНТОЛОГИИ ПРЕДМЕТНОЙ ОБЛАСТИ МАШИНОСТРОЕНИЯ

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

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

Рассмотрены методы решения задач синтеза производственных систем и их элементов в области машиностроения. Анализ-синтез становится важным этапом технологического проектирования при проведении научно-исследовательской работы. Производственная система является сложной системой, моделирование которой требует создания базы знаний, в основе которой лежит онтология предметной области. Онтология состоит из двух основных частей: структурной составляющей и обработчика знаний в виде программного обеспечения. Структурная составляющая является определяющей и представляет собой терминологическую систему предметной области. Представлено формальное описание онтологии, отвечающее современным требованиям производства. Подробно рассмотрена ее концептуальная составляющая, являющаяся системообразующей и определяющая структуру базы знаний предметной области машиностроения. Анализ-синтез производственных систем осуществляется на базе концептов предметной области. Подсистема обработки знаний строится на принципах формальной логики.

Ключевые слова: автоматизация машиностроения, анализ, синтез, онтология, база знаний, моделирование, оптимизация, терминологическая система, метаонтология.

ВВЕДЕНИЕ

Технологическое проектирование предусматривает в первую очередь проведение исследований в рассматриваемой предметной области машиностроения, основными методами которых являются анализ и синтез. Содержанием анализа является совокупность приемов и закономерностей разбиения объекта и исследование его составных частей. Так, на сегодняшний день хорошо разработан инженерный анализ, лежащий в основе САЕ-систем (Computer Aided Engeneering). Функции САЕ-систем связаны с процедурами оптимизации проектных решений. Средства САЕ-систем связаны с процедурами оптимизации проектных решений. Они могут осуществлять множество различных вариантов анализа: статического, кинематического, динамического, позволяющего оптимизировать конструкции изделий машиностроения [1]. Также разработан структурный анализ, который используется на уровне производственной системы как совокупности технологического оборудования с системой обеспечения функционирования производства, предназначенной для изготовления изделий определенной номенклатуры [2–4]. При этом производственная система является системой сложной, состоящей из подсистем, так как производственная система представляет собой систему участков, основных и вспомогательных, структура и параметры которой выбирают при проектировании в зависимости от сложности и разнообразия конструкции изготавливаемых изделий, объема их выпуска и условий производства. Особый интерес представляет организационная структура производственной системы, включающая несколько уровней: завод, цех, участок, линия. Еще одним важным с точки зрения

проектирования является производственный процесс. Это динамическая система, непосредственно связанная со структурой производственной системы, то есть анализ производственной системы должен производиться по-разному в зависимости от цели исследования. При технологическом проектировании анализ является основным этапом в создании математической модели производственной системы [5]. Сама же математическая модель не является самоцелью, а необходимым этапом в процессе оптимизации проектируемого объекта: структуры производственного участка, технологического процесса получения изделия и др. [6, 7].

АНАЛИЗ – СИНТЕЗ

Анализ представляет собой метод исследования, при котором исследуемый объект мысленно разбивается на составные части, но при этом выделенная часть осознается именно как часть целого. Структурный анализ применяется для вычленения в сложном объекте таких элементов, которые представляют самое главное в них, имеют определенное назначение и обладают свойствами, оказывающими влияние на другие части объекта. При этом все или некоторые части сами являются системами, что характерно для сложных систем (таких как производственные). Так, разработка структурной модели детали начинается с анализа конструкции детали. В процессе анализа выявляются основные параметры детали, влияющие на положение заготовки в процессе обработки, способ получения поверхностей и доступ к ним обрабатывающего инструмента. Исходя из этого, деталь структурно можно поделить на подсистемы нескольких уровней [8, 9]. Существуют различные методики проведения анализа производственных систем, но все они должны выполнять важное требование – сохранять информацию, необходимую для последующего синтеза.

Синтез – метод исследования, содержанием которого является совокупность приемов и закономерностей соединения отдельных частей объекта в единое целое. Синтез – инжиниринговое построение сложных систем из предварительно подготовленных блоков (или модулей) разных типов. Задача синтеза состоит в воспроизведении основных связей между элементами анализируемого целого [10].

Как правило, при решении конкретной производственной задачи (технической, организационной, управленческой) необходимо определить ее тип, формализовать ее, то есть в определенном виде представить имеющиеся исходные данные и формулировку вопроса, на который необходимо ответить, используя имеющуюся базу знаний.

Все проблемы можно описать формой, определяющей отношения между сущностями, являющимися объектами исследования, их атрибутами, свойствами, поведением (характеристиками) в условиях некоторой внешней среды. Иными словами, в проблеме что-то одно является неизвестным: сущность, среда или характеристики, и это неизвестное должно быть получено из оставшихся двух компонентов. В зависимости от того, что именно является неизвестным, все проблемы разделяются на три класса. Первый класс – это проблемы анализа, когда сущности заданы и исследуется вопрос о том, какие характеристики они имеют в условиях заданной внешней среды. Второй класс – это проблемы синтеза, в которых задаются требуемые характеристики и необходимо определить сущности, которые в условиях заданной среды обеспечивают получение этих характеристик. Третий класс получил название проблем оценки внешней среды. В проблемах этого класса заданы сущности и их характеристики, и надо получить такую среду (пока неизвестную), в условиях которой сущности проявляют заданные характеристики.

В общем виде алгоритм анализа представляет собой составление модели объекта, наиболее подходящей с позиции получения требуемых функций, написание

программы оценки характеристик модели и определение характеристик объекта из его модельного представления с помощью программы оценки.

Для решения проблем синтеза необходимо прибегнуть к другому подходу. Здесь стоит задача выбора объекта с заданными функциями. Общий алгоритм решения этой задачи содержит такие действия, как создание исследовательской модели, анализ этой модели как решение проблемы анализа и определение ее функций, сравнение полученных результатов с заданными требованиями и прекращение процесса решения (если результаты и требования совпадают) или же возврат, если совпадение не получено. Этот процесс носит недетерминированный итерационный характер и является более сложным, чем процесс решения проблемы анализа, в том смысле что включает в свой состав саму проблему анализа. Особенностью процесса синтеза является необходимость проведения поиска для достижения поставленной цели. Модель проблемы синтеза корректируется по результатам вычислений на стадии анализа. Для задач синтеза характерна цикличность. Причем эта цикличность имеет определенную направленность. Пусть имеется n уровней и соответственно n моделей производственной системы. Сначала система исследуется на 1-м самом высоком уровне с помощью соответствующей модели, в результате чего рассчитываются общие параметры системы и вырабатываются ограничения для последующих расчетов. Затем опускаемся на 2-й уровень, где происходит детализация модели и рассчитываются соответствующие параметры системы, после чего возвращаемся на 1-й уровень и уточняем первоначальные параметры с учетом параметров, полученных на 2-м уровне. После этого весь цикл повторяется, то есть опускаемся на 3-й уровень детализации, затем поднимаемся на 2-й, затем возвращаемся на 1-й. Таким образом, необходимо отработать все n циклов, чтобы провести полноценный синтез производственной системы.

Для проблем анализа важным моментом является создание модели объекта, ее последующий анализ и оценка, а для проблем синтеза – отыскание модели, согласованной с определенными условиями. Очевидно, правилен такой подход, при котором система подготовки знаний объединяет задачи анализа и синтеза и принимает форму системы поддержки всего процесса решения проблемы.

При обработке знаний основными являются дедуктивные выводы, производимые на основе базы знаний. Для них характерны две формы применения в зависимости от того, предназначена ли система обработки знаний для поддержки решения проблем и непосредственного исполнения дедуктивных выводов и базы знаний или же эта система включает в себя дедуктивные выводы как один из функциональных элементов.

ОНТОЛОГИЯ ПРЕДМЕТНОЙ ОБЛАСТИ. СТРУКТУРА И СВОЙСТВА

Онтология – эксплицитная спецификация концептуализации, где в качестве концептуализации выступает описание множества объектов предметной области связей между ними. Формально онтология состоит из терминов, организационных в таксономию, их определений и атрибутов, а также связанных с ними аксиом и правил вывода и представляет собой базу знаний, описывающую факты, которые предполагаются истинными в рамках определенной области на основе общепринятого смысла используемого словаря [11]. При построении онтологических систем необходимо соблюдать следующие требования:

формализации, то есть описание объектов действительности в единых терминах; использование ограниченного количества базовых терминов, на основе которых конструируются все остальные понятия;

внутренней целостности и логической непротиворечивости [12].

Рассматриваемая онтология предметной области машиностроения, отвечающая этим требованиям и являющаяся реализацией базы знаний в области машиностроения (АБЗМ), состоит из двух подсистем: онтологии АБЗМ и пакета прикладных программ (ППП) АБЗМ. Эти две подсистемы тесно связаны между собой: основой системы является онтология АБЗМ, определяющая структуру и сложность ППП АБЗМ и возможности системы в целом [13, 14].

Формально онтология рассматривается как триплет $O = \{T, R, F\}$ [14],

где T – множество концептов предметной области;

R – множество отношений между концептами;

F – функции интерпретации, заданные на сущностях и/или отношениях онтологии.

Рассматриваемая онтология состоит из двух: метаонтологии и онтологии предметной области, при этом основными элементами и той и другой онтологий являются термины. Чтобы их различать, онтология АБЗМ формально представлена как

$$ОАБЗМ = \{ПО АБЗМ, М АБЗМ\},$$

где ПО АБЗМ – предметная онтология АБЗМ;

М АБЗМ – метаонтология АБЗМ.

$$ПО АБЗМ = \{T^n, R^n, F^n\},$$

где T^n – множество терминов предметной онтологии;

R^n – множество отношений между терминами предметной онтологии;

F^n – функции интерпретации, заданные на терминах предметной онтологии.

Соответственно

$$МО АБЗМ = \{T^m, R^m, F^m\},$$

где T^m – множество терминов (концептов) метаонтологии;

R^m – множество отношений между терминами (концептами) метаонтологии;

F^m – функции интерпретации, заданные на терминах (концептах) метаонтологии.

В принятых обозначениях как предметной онтологии, так и метаонтологии вместо термина «множество концептов» использован термин «множество терминов». Действительно, в математической логике «концепт» и «смысл понятия» являются синонимами. Это объясняется тем, что в научной литературе термин «концепт» употребляется тогда, когда абстрагируются от культурного содержания, а говорят только о структуре. Точно так же этот термин используется в математической логике. В культурологии, напротив, понимание смысла включает нечто большее, например сжатую и синтезированную в одно целое историю концепта. Надо отметить, что с точки зрения культурологии такое понимание смысла является доминирующим в структуре концепта, то есть существуют особые термины, обозначающие наиболее общие категориальные понятия, которые можно назвать концептуальными.

Производственная система, для которой создана база знаний, представляет собой социотехническую систему, поэтому в ней должны учитываться культурологические особенности, ее описывающие. Так как предметная онтология и метаонтология синтезируются в одну систему, а в их основе лежат термины, то корректнее все множество терминов разделить на множество терминов предметной онтологии и множество терминов метаонтологии, которое по сути в свете вышесказанного является концептуальной терминологией.

Современные компьютерные системы, несмотря на их разнообразие и продвинутость, предоставляют пользователю для построения его системы две возможности: ввод/хранение информации и ее обработку. Соответственно, две первые составляющие любой онтологии (множество терминов и множество отношений между ними) могут быть представлены в виде базы данных, а третья (функции интерпретации) – в виде обработчика, то есть программно.

Концептуальная терминология является основой для системы в целом, а ее формальное описание во многом определяет свойства предметной онтологии и метаонтологии. К метаонтологии предъявляются следующие требования:

концептуальная терминология включает только термины, обозначающие категории по отношению к терминам предметной области, при этом любое понятие, обозначаемое термином предметной онтологии при обобщении, всегда подпадает под ту и/или иную категорию метаонтологии (другими словами, объем любого понятия, обозначаемого термином предметной онтологии, входит в объем одного или нескольких понятий метаонтологии);

количество концептуальных терминов должно быть достаточным для описания предметной области, но не должно быть больше необходимого, чтобы не было дублирования, которое могло бы усложнить всю систему и создать при интерпретации (программной обработке) неразрешимые ситуации с логической точки зрения;

метаонтология должна быть логически непротиворечивой и являться системообразующей всей онтологии; ее структура определяет структуру предметной онтологии, на ее основе строится алгоритм проверки целостности системы;

концептуальная терминология должна быть расширяема без кардинального изменения структуры и содержания программного обеспечения.

Структура концептуальной терминологии представлена в виде графа [15] (рис. 1). Здесь k^{rod} – термин, обозначающий родовое понятие; k^{vid} – термин, обозначающий видовое понятие; k^v – вещественный объект; k^p – процесс; k^s – свойство; k^{st} – термин, обозначающий систему; k^{el} – термин, обозначающий элемент системы; $s^r(x_i, x_j)$ – связь между i -м и j -м терминами, где r обозначает тип связи: $r = \{r_1, r_2\}$, $r_1 = (1 - \text{если связь направленная, при этом } x_i - \text{термин, от которого направлена связь, } x_j - \text{термин, к которому направлена связь; } 0 - \text{если связь ненаправленная}), r_2 = (1 - \text{если связь сильная, } 0 - \text{если связь слабая}).$

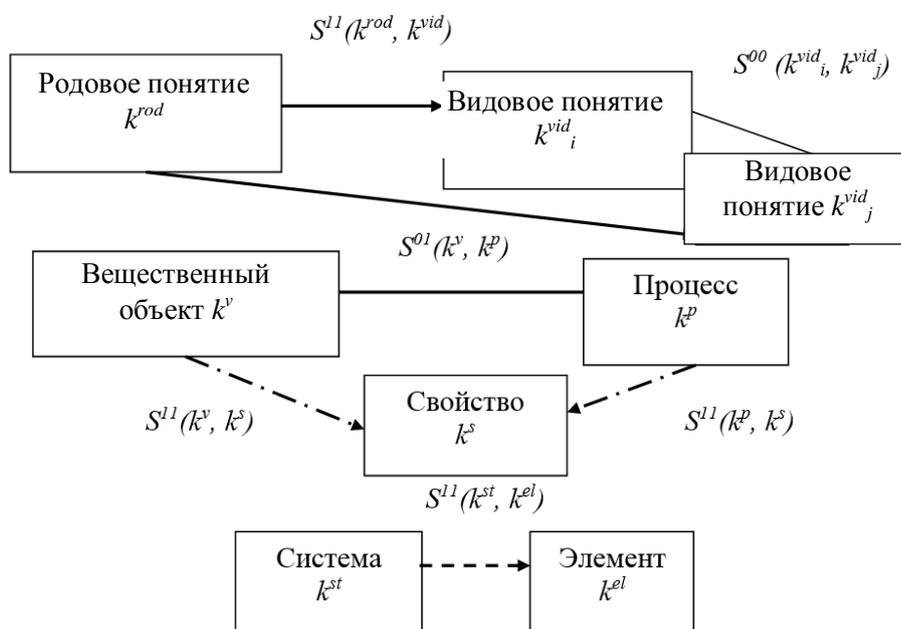


Рис. 1. Концептуальная терминология, представленная в виде графа

Логическая связь $S^{11}(k^{rod}, k^{vid})$ является связью наиболее общей среди системообразующих элементов терминологической системы, как и сами понятия «род», «вид», – на схемах обозначается прямой линией со стрелкой. Связь $S^{00}(k^{vid}_i, k^{vid}_j)$ между

двумя терминами, обозначающими видовые понятия, обозначается тонкой линией. Связь $S^{0l}(k^v, k^p)$ между вещественным объектом и процессом, протекающим в нем, обозначим утолщенной двойной линией. Связь $S^{1l}(k^v, k^s)$ между вещественным объектом и его свойством обозначим стрелкой со штрихпунктирной линией. Аналогично обозначается связь $S^{1l}(k^p, k^s)$ между процессом и его свойством. Связь «система–элемент» $S^{1l}(k^{st}, k^{el})$ на схемах изображается в виде пунктирной линии со стрелкой.

Множество терминов метаонтологии (T^m) может быть представлено в виде отношения реляционной базы данных (БД) *mcconcept* (рис. 2). Здесь *mcN* – номер термина, *mcTerm* – наименование термина, *mcCod* – код термина, используемого в системе.

<i>mcN</i>	<i>mcTerm</i>	<i>mcCod</i>
1	Родовое понятие	R
2	Видовое понятие	D
3	Вещественный объект	V
4	Свойство	S
5	Процесс	P
6	Система	C
7	Элемент	H

Рис. 2. Отношение *mcconcept* реляционной базы данных, описывающее составляющую T^m метаонтологии

Множество отношений между терминами метаонтологии (R^m) может быть представлено в виде отношения *mtie* (рис. 3).

<i>mtN</i>	<i>mtTerm1</i>	<i>mtTerm2</i>	<i>mtStrong</i>	<i>mtDirect</i>	<i>mtDispos</i>	<i>mtStreight</i>
1	R	D	1	1	∅	∅
2	D	D	1	∅	∅	∅
3	V	P	1	∅	∅	∅
4	V	S	1	1	∅	∅
5	P	S	1	1	∅	∅
6	C	H	1	1	∅	∅
7	H	H	1	∅	∅	∅

Рис. 3. Отношение *mtie* реляционной базы данных, описывающее составляющую R^m метаонтологии

На рис. 3 приняты следующие обозначения:

mtN – номер связи, представленной дугой в графе концептуальной терминологии;

mtTerm1 – код первого термина, обозначаемого вершиной, инцидентной дуге с номером *mtN*;

mtTerm2 – код второго термина, обозначаемого вершиной, инцидентной дуге с номером *mtN*;

mtStrong – свойство связи, характеризующее ее силу (1 – сильная, ∅ – слабая);

mtDirect – свойство связи, характеризующее ее направление (1 – направленная, ∅ – ненаправленная);

mtDispos – свойство связи, характеризующее тип направления (\emptyset – равнонаправленная, если *mtDirect* = \emptyset , \emptyset – подчинения, если *mtDirect* = 1, 1 – управления, если *mtDirect* = 1);

mtStreight – свойство связи: \emptyset – прямая, 1 – обратная (при *mtDirect* = \emptyset не имеет смысла).

В соответствии с обозначениями, введенными в реляционной базе данных, граф (см. рис. 1) примет иной вид (рис. 4).

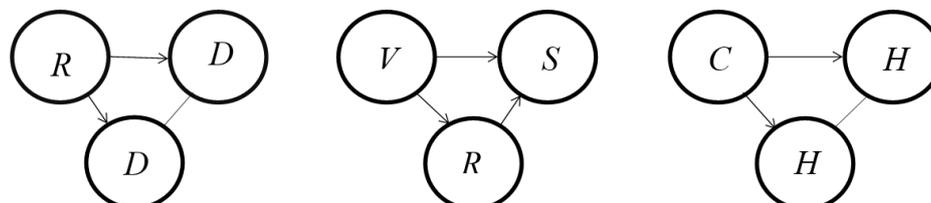


Рис. 4. Граф метаонтологии

Предметная онтология описывается множеством терминов предметной области (T^n), представленной отношением *ptermin* (рис. 5).

<i>Ptermin</i>					
<i>ptCode</i>	<i>ptName</i>	<i>ptPods</i>	<i>ptSubs</i>	<i>ptSin</i>	<i>ptMain</i>

Рис. 5. Отношение *ptermin* реляционной базы данных, описывающее множество T^n предметной онтологии

Здесь *ptCode* – код термина, выраженный целым числом; *ptName* – слово (термин); *ptPods* – обозначает принадлежность термина к одной из трех подсистем, описанных в метаонтологии (*V*, *P*, *S*); *ptMain* – может принимать значение *truth* (истина), если термин является основным; *ptSin* – может принимать значение *truth* (истина), если термин является синонимом; *ptMain* – обозначает код основного термина.

Отношение *ptermin* учитывает то, что в системе могут существовать термины, обозначающие понятия-синонимы. При этом выбирается основной термин, который участвует во всех операциях с терминами предметной области. Остальные считаются синонимами и при обращении к системе заменяются на основные.

Множество отношений между терминами предметной области R^n определяется множеством отношений между терминами метаонтологии (R^m) (рис. 6):

отношение *pTie1rd* описывает две связи: между родовым и видовым понятиями и между видовыми понятиями, полученными при делении родового понятия по одному основанию (*pt1Rd* – номер связи, *p1Codr* – код термина родового понятия, *pt1Codd* – код термина видового понятия, *pt1Dd* – номер связи между видовыми понятиями, полученными при делении родового понятия по одному основанию);

отношение *pTie2ch* описывает две связи: между системой и элементом и между элементами одной системы (*pt2Ch* – номер связи, *pt2Cod1* – код термина системного понятия, *pt2Cod2* – код термина понятия элемента системы, *pt2Hh* – номер связи между элементами, относящимися к одной системе) *pt2Cod1*;

отношение *pTie3vp* описывает связи между термином вещественного объекта и термином процесса: если такая связь существует, то это означает, что рассматриваемый вещественный объект непосредственно связан с процессом, то есть процесс происходит

именно с этим или в этом материальном объекте ($pt3Vp$ – номер связи, $pt3Codv$ – код термина вещественного объекта, $Pt3Codp$ – код термина процесса);

отношение $pTie4vs$ описывает связи между материальными объектами и свойствами: если такая связь существует, то это означает, что рассматриваемый объект имеет соответствующее свойство ($Pt4Vs$ – номер связи, $Pt4Codv$ – код термина вещественного объекта, $Pt4Cods$ – код термина свойства);

отношение $pTie5ps$ описывает связи между объектами-процессами и свойствами: если такая связь существует, то это означает, что рассматриваемый процесс имеет соответствующее свойство ($Pt5Ps$ – номер связи, $Pt5Codp$ – код термина процесса, $Pt5Cods$ – код термина свойства).

<i>pTie1rd</i>			
<i>Pt1Rd</i>	<i>Pt1Codr</i>	<i>Pt1Codd</i>	<i>Pt1Dd</i>
<i>pTie2ch</i>			
<i>Pt2Ch</i>	<i>Pt2Cod1</i>	<i>Pt2Cod2</i>	<i>Pt2Hh</i>
<i>pTie3vp</i>			
<i>Pt3Vp</i>	<i>Pt3Codv</i>	<i>Pt3Codp</i>	
<i>pTie4vs</i>			
<i>Pt4Vs</i>	<i>Pt4Codv</i>	<i>Pt4Cods</i>	
<i>pTie5ps</i>			
<i>Pt5Ps</i>	<i>Pt5Codp</i>	<i>Pt5Cods</i>	

Рис. 6. Отношения, описывающие связи между терминами предметной онтологии

Подсистема обработки знаний строится на принципах формальной логики. Так, на основе связей $S^{11}(k^{rod}, k^{vid})$, $S^{11}(k^p, k^s)$ и $S^{00}(k^{vid}_i, k^{vid}_j)$ или $S^{11}(k^{rod}, k^{vid})$, $S^{11}(k^v, k^s)$ и $S^{00}(k^{vid}_i, k^{vid}_j)$ можно сгенерировать реляционные суждения. Пусть k_1, k_2, \dots, k_n – термины, обозначающие понятия-члены деления по одному основанию объема родового понятия k , при этом род может быть не обязательно ближайшим. Пусть термин k связан с термином-«свойством» k^s . По правилам построения терминологической системы понятия, обозначаемые терминами k_1, k_2, \dots, k_n , наследуют свойство k^s , при этом оно уточняется вплоть до числовых значений. Тогда k_1 связан с k^s_1 , k_2 – с k^s_2 , \dots , k_n – с k^s_n , на основании чего можно сформулировать соответствующее реляционное суждение. Например, пусть k = «металлорежущий станок», k_1 = «станок модели 1М63РФ3», k_2 = «станок модели 1Н65РФ3». Термин k связан с термином k^s = «мощность главного привода, кВт». k^s_1 = «22», k^s_2 = «30». Тогда можно сгенерировать следующее реляционное суждение: «С точки зрения главного привода станок модели 1Н65РФ3 мощнее, чем станок модели 1М63РФ3». Сложные суждения можно построить практически на основании любой связи между терминами терминологической системы вне зависимости от типа этой связи с той только разницей, что, если связь имеет направление, то на ее основании можно построить только одно суждение, если нет – то два. Дело в том, что любая связь обозначает зависимость существования одного или нескольких объектов от других, что, собственно, и определяет место термина в терминологической системе и соответственно реального объекта в окружающей среде. Сложные суждения позволяют генерировать наличие конструкций терминологической системы, включающей термины разных подсистем и связи $S^{11}(k^{st}, k^{el})$ и $S^{11}(k^{rod}, k^{vid})$. Разнообразие таких конструкций зависит от количества научных концепций в рассматриваемой предметной области, заложенных при разработке и заполнении базы знаний. Логические концепты, лежащие в основе онтологии, позволяют генерировать как различные суждения, рассмотренные выше, так и строить умозаключения. Так как структура терминологической системы является иерархической, на верхнем уровне

которой представлены термины, обозначающие наиболее общие понятия рассматриваемой предметной области, а на нижнем уровне – единичные понятия, в объем которых входит один реальный объект (вещественный объект, процесс или числовое значение параметра), а сама система имеет многоуровневое построение, то переход с верхнего уровня на нижний осуществляется с помощью дедуктивных умозаключений, а переход с нижнего на верхний – с помощью индуктивных умозаключений.

Синтез производственных систем осуществляется на базе концептов предметной области. Такое построение терминологической системы позволяет жестко регламентировать место каждого термина в соответствии с принятыми в системе концептами. Место термина в системе определяет целый комплекс свойств объекта, им обозначаемого. Если на уровне концептуальной терминологии мы имеем дело с абстрактными объектами, то при движении сверху вниз объекты все больше конкретизируются, так как система строится по правилам таксономического деления. Например, концепт *посадка в системе вала* предусматривает наличие фиксированного поля допуска вала (*основной вал*) и целого спектра полей допусков сопрягаемого с ним отверстия (*неосновное отверстие*). В терминологической системе концепт будет представлен системным термином *система вала*, состоящим из двух элементов: *основной вал* и *неосновное отверстие*. Все их видовые понятия, представленные в системе, будут обладать соответствующими свойствами, что позволит синтезировать множество всех возможных посадок соединения *отверстие–вал* в системе вала для выбранного номинального диаметра. Из этого множества выбирается оптимальная посадка в соответствии с техническими требованиями, предъявляемыми к соединению. Другим примером может служить синтезирование типового или группового технологического процесса на основании построения структурной модели объекта обработки на базе онтологии предметной области машиностроения [16].

ВЫВОД

Синтез является одним из важных этапов технологического проектирования производственных систем, которые являются системами сложными. В основе синтеза должны лежать научные концепты, раскрывающие основные закономерности структуры и поведения моделируемого объекта в предметной области машиностроения. Задачи анализа-синтеза производственных систем могут быть решены только на базе системы, которая обладает целостностью и позволяет создавать модели, отражающие разные стороны производственной системы в зависимости от цели исследователя.

ЛИТЕРАТУРА

1. Полетаева Е.В., Горлов И.В. Современные системы конструкторской и технологической подготовки производства: учебное пособие. Тверь: Тверской государственный технический университет. 2016. 100 с.
2. Бурцев В.М., Васильев А.С., Дальский А.М. Технология машиностроения: Т. 1. Основы технологии машиностроения. М.: МГТУ им. Баумана. 2001. 564 с.
3. Медведев В.А., Вороненко В.П., Брюханов В.Н. и др. Технологические основы гибких производственных систем. М.: Высшая школа. 2000. 255 с.
4. Цаплин А.И. Основы научных исследований в технологии машиностроения. Пермь: Пермский национальный исследовательский политехнический ун-т. 2014. 228 с.
5. Рябов С.А., Костенков С.А., Лугачева Н.А. Выбор оборудования для реализации технологических процессов в условиях различной серийности производства. Кемерово: ГУ КузГТУ. 2008. 127 с.
6. Митрофанов В.Г. Математическое моделирование задач машиностроения. *Станки и инструмент*. 2000. № 9. С. 9–11.

7. Зелинский А.Н. Математические методы оптимизации в машиностроительном производстве. Алчевск: ДонГТУ. 2013. 157 с.
8. Бухалков М.И., Кузьмин М.А., Павлов В.В. Особенности проектирования и организации группового производства в машиностроении. *Организатор производства*. 2010. № 4. С. 27–32.
9. 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.
10. Казиев В.М. Введение в анализ, синтез и моделирование систем. М.: БИНОМ. 2007. 244 с.
11. Никитенко А.А. Обзор баз знаний онтологического типа. *Искусственный интеллект*. 2010. № 4. С. 208–219.
12. Гладун А.Я., Рогушина Ю.В. Онтологии в корпоративных системах. Часть 1. *Корпоративные системы*. 2006. № 1. С. 41–47.
13. Полетаева Е.В. Требования, предъявляемые к онтологии в области машиностроения, при автоматизации технологического проектирования. *Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел, деталей технологического и энергетического оборудования*. 2014. № 7. С. 155–158.
14. Онтология [Электронный ресурс]. Википедия. Режим доступа: <http://ru.science.wikia.com/wiki/Онтология> (дата обращения: 12.02.2019).
15. Полетаева Е.В. Построение информационной системы машиностроительного производства на базе предметной онтологии: монография. Тверь: Тверской государственный технический университет. 2015. 196 с.
16. Ворошилова М.В., Полетаева Е.В. Создание типового технологического процесса на примере детали типа «стакан». *Вестник Тверского государственного технического университета*. 2017. № 2 (32). С. 60–63.

THE DECISION OF INDUSTRIAL SYSTEMS SYNTHESIS PROBLEMS BASED ON ONTOLOGY ENGINEERING

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

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

There are methods of solving the problems of synthesis of production systems and their elements in the field of mechanical engineering. Analysis-synthesis is an important stage of technological design during the research work. The production system is a complex system, the modeling of which requires the creation of a knowledge base, which is based on the subject area ontology. Ontology consists of two main parts: structural component and knowledge processor in the form of software. The structural component is the defining and is a terminological system of the subject area. Here is presented a formal description of the ontology that meets the requirements of modern production. Its conceptual component, which is the backbone and determines the structure of the knowledge base of the subject area of mechanical engineering, is considered in detail. Analysis-synthesis of production systems is carried out on the basis of concepts of the subject area. The subsystem of knowledge processing is based on the principles of formal logic.

Keywords: automation of mechanical engineering, analysis, synthesis, ontology, knowledge base, modeling, optimization, terminology system, meta-ontology.

REFERENCES

1. Poletaeva E.V., Gorlov I.V. *Sovremennyye sistemy konstruktorskoj i tekhnologicheskoy podgotovki proizvodstva: uchebnoye posobiye*. [Modern systems of design and technological preparation of production: textbook]. Tver: TvGTU. 2016. 100 p. (In Russian).
2. Burtsev V.M., Vasilyev A.S., Dalsky A.M., etc. *Tekhnologiya mashinostroyeniya: T. 1. Osnovy tekhnologii mashinostroyeniya*. [Technology of mechanical engineering: T. 1. Fundamentals of technology of mechanical engineering]. Moscow: MSTU of Bauman. 2001. 564 p. (In Russian).
3. Medvedev V.A., Voronenko V.P., Bryukhanov V.N. i dr. *Tekhnologicheskiye osnovy gibkikh proizvodstvennykh sistem*. [Technological basis of flexible production systems]. Moscow: Vyssh. shk. 2000. 255 p. (In Russian).
4. Tsaplin A.I. *Osnovy nauchnykh issledovaniy v tekhnologii mashinostroyeniya*. [Bases of scientific researches in manufacturing engineering]. Perm': Perm. nats. issled. politekhn. un-t. 2014. 228 p. (In Russian).
5. Ryabov S.A., Kostenkov S.A., Lugacheva N.A. *Vybor oborudovaniya dlya realizatsii tekhnologicheskikh protsessov v usloviyakh razlichnoy seriynosti proizvodstva*. [Choice of equipment for the implementation of technological processes in different series production]. Kemerovo: GU KuzGTU. 2008. 127 p. (In Russian).
6. Mitrofanov V.G. *Mathematical modeling of mechanical engineering problems. Stanki i instrument*. 2000. No 9, pp. 9–11. (In Russian).
7. Zelinsky A.N. *Matematicheskiye metody optimizatsii v mashinostroitel'nom proizvodstve*. [Mathematical optimization techniques in engineering production]. Alchevsk: DonGTU. 2013. 157 p.
8. Bukhalkov M.I., Kuzmin M.A., Pavlov V.V. *Features of the design and organization of group production in mechanical engineering. Organizator proizvodstva*. 2010. No 4, pp. 27–32. (In Russian).
9. Askalonova T.A., Leonov S.L., Sitnikov A.A. *Organization of group technology in flexible production systems. Vestnik sovremennykh tekhnologiy*. 2016. № 1 (1), pp. 4–9. (In Russian).
10. Kaziev V.M. *Vvedeniye v analiz, sintez i modelirovaniye system* [Introduction to the analysis, synthesis and modeling of systems. Moscow: BINOM. 2007. 244 p. (In Russian).
11. Nikitenko A.A. *Overview of knowledge bases ontological type. Iskusstvennyy intellekt*. 2010. No 4, pp. 208–219. (In Ukraine).
12. Gladun A.J., Dolgushina U.V. *Ontologies in enterprise systems. Part 1. Korporativnyye sistemy*. 2006. No 1, pp. 41–47. (In Russian).
13. Poletaeva E.V. *Requirements for ontology in the field of mechanical engineering, in the automation of technological design. Mekhanika i fizika processov na poverhnosti i v kontakte tvyordyh tel, detalej tekhnologicheskogo i ehnergeticheskogo oborudovaniya*. 2014. No 7, pp. 155–158. (In Russian).
14. *Ontology* [Electronic resource]. Encyclopedia Wikipedia. Mode of access: <http://ru.science.wikia.com/wiki/Ontology>
15. Poletaeva E.V. *Postroyeniye informatsionnoy sistemy mashinostroitel'nogo proizvodstva na baze predmetnoy ontologii: monografiya* [Information system of machine-building production on the basis of subject domain ontologies, Monograph]. Tver: TvGTU. 2015. 196 p.
16. Voroshilova M.V., Poletaeva E.V. *Creation of a typical technological process on the example of a detail of the «glass» type. Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2017. No 2 (32), pp. 60–63. (In Russian).

ТРАНСПОРТНОЕ, ГОРНОЕ И СТРОИТЕЛЬНОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 622.331.002.5

ПОЛНЫЙ ФАКТОРНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ЗАВИСИМОСТИ ЭНЕРГОЕМКОСТИ ФОРМОВАНИЯ КУСКОВОГО ТОРФА ОТ КОЭФФИЦИЕНТА НАПОРА И СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ ШНЕКА

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

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

Полученные в ходе ранее проведенного исследования зависимости энергоемкости формования кускового торфа от диаметра мундштука и скорости вращения формующего шнека показали, что для всех исследованных режимов существует минимум энергоемкости при формовании, приходящийся на область 220...320 об/мин шнека. Методом планирования двухфакторного эксперимента построены функции отклика, описывающие зависимость энергоемкости формования от коэффициента напора и частоты вращения шнека для двух исследованных зон, ограниченных частотой вращения шнека. Произведен подсчет и проанализирована значимость коэффициентов уравнений регрессии. Результаты показали, что все найденные коэффициенты в уравнениях являются значимыми на уровне достоверности $P = 95 \%$, а изменение коэффициента напора больше влияет на интенсивность изменения энергоемкости формования, чем изменение частоты вращения шнека.

Ключевые слова: кусковой торф, формование, энергоемкость, шнековый пресс, коэффициент напора, частота вращения, уравнение регрессии, достоверность.

ВВЕДЕНИЕ

Описанные в работах [1–3] результаты проведенного эксперимента по формованию кускового торфа шнековым прессом выявили ряд трендовых зависимостей энергоемкости от скорости вращения шнека и диаметра формующего мундштука. Определена зона наименьшей энергоемкости при формовании, находящаяся в границах скорости вращения шнека 220...320 об/мин. Установлено: интенсивность изменения удельных энергозатрат выше при формовании с мундштуком меньшего диаметра; бóльшая энергоемкость в исследованной зоне при прочих равных условиях соответствует использованию шнека с бóльшим шагом. Наиболее рациональным режимом представляется частота вращения шнека $n = 220...320$ об/мин при коэффициенте напора $k_n = 2,22$ и шаге витков шнека $S = 50$ мм (то есть равном половине диаметра шнека D). Кроме того, с использованием метода проверки статистических гипотез доказано, что на энергоемкость формования кускового торфа на различных режимах шнеками с шагом витков 110 и 50 мм влияет один и тот же набор факторов.

Поскольку наиболее рациональными из всех исследованных являются режимы, в которых применялся шнек с шагом витков, равным половине диаметра, а перечень технико-механических факторов, влияющих на энергоемкость формования,

ограничивается коэффициентом напора и числом оборотов шнека, следует найти функцию отклика, являющуюся зависимостью энергоемкости A от двух факторов: коэффициента напора и числа оборотов шнека. Данная задача решается с помощью метода планирования с составлением оптимального двухуровневого плана или полного двухфакторного эксперимента (ПФЭ), метод которого достаточно полно изложен в работах [4, 5]. В результате будет получена математическая модель:

$$A = f(k_n; n). \quad (1)$$

Обработку результатов необходимо проводить для экспериментов, в которых применялся шнек с шагом витков 50 мм. Учитывая характер полученных зависимостей, для повышения точности функции отклика все поле экспериментальной зависимости целесообразно разбить на две области: от минимальной до средней частоты вращения шнека и от средней до максимальной.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для двух факторов уравнение регрессии без членов высшего порядка имеет вид

$$A = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_{12}X_1X_2, \quad (2)$$

где X_1, X_2 – кодированные значения факторов; b_0 – свободный член; b_1, b_2 – коэффициенты уравнения регрессии при соответствующих X_i , характеризующие влияние данного фактора на функцию отклика; b_{12} – коэффициент уравнения регрессии, свидетельствующий о двойном взаимодействии факторов [4].

Первая область экспериментальной зависимости энергоемкости A_1 [МДж/м³] от коэффициента напора и частоты вращения шнека имеет зону значений исследуемого параметра, ограниченную минимальной и средней частотой вращения шнека n_1 : $k_n = [k_n^{min}; k_n^{max}] = [0,95; 2,96]$; $n_1 = [n_1^{min}; n_1^{max}] = [55,81; 183,28]$ об/мин.

Центр плана эксперимента:

$$k_n^0 = \frac{k_n^{max} + k_n^{min}}{2} = \frac{2,96 + 0,95}{2} = 1,955; \quad (3)$$

$$n_1^0 = \frac{n_1^{max} + n_1^{min}}{2} = \frac{183,28 + 55,81}{2} = 119,545 \text{ об/мин.} \quad (4)$$

Интервал варьирования факторов:

$$\Delta k_n = \pm \frac{k_n^{max} - k_n^{min}}{2} = \pm \frac{2,96 - 0,95}{2} = \pm 1,005; \quad (5)$$

$$\Delta n_1 = \pm \frac{n_1^{max} - n_1^{min}}{2} = \pm \frac{183,28 - 55,81}{2} = \pm 63,735 \text{ об/мин.} \quad (6)$$

Кодированные значения факторов:

$$X_1^{min} = \frac{k_n^{min} - k_n^0}{\Delta k_n} = -1; \quad (7)$$

$$X_1^{max} = \frac{k_n^{max} - k_n^0}{\Delta k_n} = +1; \quad (8)$$

$$X_1 = \frac{k_n - 1,955}{1,005}; \quad (9)$$

$$X_2^{min} = \frac{n_1^{min} - n_1^0}{\Delta n_1} = -1 ; \quad (10)$$

$$X_2^{max} = \frac{n_1^{max} - n_1^0}{\Delta n_1} = +1 ; \quad (11)$$

$$X_2 = \frac{n_1 - 119,545}{63,735} . \quad (12)$$

Матрица планирования эксперимента для первой области, построенная на основе экспериментальных данных [1, 2], представлена в табл. 1.

Таблица 1. Матрица планирования эксперимента для первого поля зависимости энергоемкости формования от коэффициента напора и частоты вращения шнека

Фактор	Уровень			Шаг варьирования				
	-1	0	+1					
k_H	0,95	1,955	2,96	1,005				
n_1	55,81	119,545	183,28	63,735				
Номер варианта	Планирование				Выход			Расчет
	X_0	X_1	X_2	X_1X_2	$A_j^{(1)}$	$A_j^{(2)}$	$A_j^{(3)}$	\bar{A}_j
1	+	-	-	+	1,10435	1,3128	1,18921	1,20212
2	+	+	-	-	3,4567	3,0874	2,85448	3,13286
3	+	-	+	-	0,7989	0,8743	0,963659	0,878953
4	+	+	+	+	1,7084	1,5836	1,72568	1,67256

Для упрощения записи в матрице планирования вместо +1 и -1 уровни кодированных факторов обозначены как + и -. Данные по энергоемкости для эксперимента с трехкратной повторяемостью ($A_j^{(1-3)}$) взяты из журнала проведения эксперимента. Среднее значение энергоемкости по эксперименту с трехкратной повторяемостью (\bar{A}_j) так же взято из журнала проведения эксперимента и материалов работ [1, 2].

Расчет коэффициентов уравнения (2) регрессии b_k ведется по формуле [5]:

$$b_k = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \bar{A}_j X_{ij} , \quad (13)$$

где N – номер серии опытов (для двухуровневого двухфакторного плана $N = 4$); i и j – номер строк и столбцов в матрице планирования соответственно.

Таким образом,

$$\begin{aligned} b_0 &= \frac{1}{4} (1,20212 + 3,13286 + 0,878953 + 1,67256) = 1,72162; \\ b_1 &= \frac{1}{4} (-1,20212 + 3,13286 - 0,878953 + 1,67256) = 0,68109; \\ b_2 &= \frac{1}{4} (-1,20212 - 3,13286 + 0,878953 + 1,67256) = -0,44587; \\ b_{12} &= \frac{1}{4} (1,20212 - 3,13286 - 0,878953 + 1,67256) = -0,28428. \end{aligned}$$

При подстановке найденных коэффициентов b_k в уравнение регрессии (2) для кодированных значений факторов $|X_1| \leq 1$ и $|X_2| \leq 1$ имеем:

$$A_1 = 1,72162 + 0,68109X_1 - 0,44587X_2 - 0,28428X_1X_2 . \quad (14)$$

Данное уравнение можно представить в натуральном виде путем замены в нем кодированных переменных (9) и (12):

$$A_1 = 1,72162 + 0,68109 \left(\frac{k_H - 1,955}{1,005} \right) - 0,44587 \left(\frac{n_1 - 119,545}{63,735} \right) - 0,28428 \left(\frac{k_H - 1,955}{1,005} \right) \left(\frac{n_1 - 119,545}{63,735} \right). \quad (15)$$

После упрощения уравнение преобразуется:

$$A_1 = 0,19577 + 1,20827k_H + 0,00168n_1 - 0,00444k_H n_1. \quad (16)$$

Полученное уравнение, как было отмечено выше, справедливо для первой области экспериментально полученной зависимости, для которой частота вращения шнека изменяется от минимальной до средней.

Вторая область экспериментальной зависимости энергоемкости A_2 [МДж/м³] от коэффициента напора и частоты вращения шнека имеет зону значений исследуемого параметра, ограниченную средней и максимальной частотой вращения шнека n_2 : $k_H = [k_H^{min}; k_H^{max}] = [0,95; 2,96]$; $n_2 = [n_2^{min}; n_2^{max}] = [183,28; 429,86]$ об/мин.

Центр плана эксперимента

$$n_2^0 = \frac{n_2^{max} + n_2^{min}}{2} = \frac{429,86 + 183,28}{2} = 306,57 \text{ об/мин.} \quad (17)$$

Интервал варьирования фактора

$$n_2 = \pm \frac{n_2^{max} - n_2^{min}}{2} = \pm \frac{429,86 - 183,28}{2} = \pm 123,29 \text{ об/мин.} \quad (18)$$

Кодированное значение фактора:

$$X_2^{min} = \frac{n_2^{min} - n_2^0}{\Delta_2} = -1; \quad (19)$$

$$X_2^{max} = \frac{n_2^{max} - n_2^0}{\Delta_2} = +1; \quad (20)$$

$$X_2 = \frac{n_2 - 306,57}{123,29}. \quad (21)$$

Для кодирования фактора X_1 справедливы формулы (7–9), полученные ранее для первого поля экспериментальной зависимости.

Матрица планирования эксперимента для второй области, построенная на основе экспериментальных данных [1, 2], представлена в табл. 2.

Данные по энергоемкости для эксперимента с трехкратной повторяемостью ($A_j^{(1-3)}$) взяты из журнала проведения эксперимента. Среднее значение энергоемкости по эксперименту с трехкратной повторяемостью (\bar{A}_j) так же взято из журнала проведения эксперимента и материалов работ [1, 2].

Расчет коэффициентов уравнения (2) регрессии b_k ведется по формуле (13) [5]:

$$b_0 = \frac{1}{4}(0,878953 + 1,67256 + 0,99803 + 3,0417) = 1,64781;$$

$$b_1 = \frac{1}{4}(-0,878953 + 1,67256 - 0,99803 + 3,0417) = 0,70932;$$

$$b_2 = \frac{1}{4}(-0,878953 - 1,67256 + 0,99803 + 3,0417) = 0,37205;$$

$$b_{12} = \frac{1}{4}(0,878953 - 1,67256 - 0,99803 + 3,0417) = 0,31252.$$

При подстановке найденных коэффициентов b_k в уравнение регрессии (2) для кодированных значений факторов $|X_1| \leq 1$ и $|X_2| \leq 1$ имеем:

$$A_2 = 1,64781 + 0,70932X_1 + 0,37205X_2 + 0,31252X_1X_2. \quad (22)$$

Таблица 2. Матрица планирования эксперимента для второго поля зависимости энергоемкости формования от коэффициента напора и частоты вращения шнека

Фактор	Уровень			Шаг варьирования				
	-1	0	+1					
k_H	0,95	1,955	2,96	1,005				
n_2	183,28	306,57	429,86	123,29				
Номер варианта	Планирование				Выход			Расчет
	X_0	X_1	X_2	X_1X_2	$A_j^{(1)}$	$A_j^{(2)}$	$A_j^{(3)}$	\bar{A}_j
1	+	-	-	+	0,8567	0,9312	0,84896	0,878953
2	+	+	-	-	1,72356	1,6074	1,68672	1,67256
3	+	-	+	-	1,02674	0,9457	1,02165	0,99803
4	+	+	+	+	2,9655	2,88427	3,27533	3,0417

Данное уравнение можно представить в натуральном виде путем замены в нем кодированных переменных (9) и (21):

$$A_2 = 1,64781 + 0,70932 \left(\frac{k_H - 1,955}{1,005} \right) + 0,37205 \left(\frac{n_2 - 306,57}{123,29} \right) + 0,31252 \left(\frac{k_H - 1,955}{1,005} \right) \left(\frac{n_2 - 306,57}{123,29} \right). \quad (23)$$

После упрощения уравнение преобразуется:

$$A_2 = 0,85453 - 0,06746k_H - 0,00191n_2 + 0,00252k_H n_2. \quad (24)$$

Полученное уравнение справедливо для второй области экспериментально полученной зависимости, для которой частота вращения шнека изменяется от средней до максимальной.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Таким образом, для двух областей зависимости энергоемкости формования от коэффициента напора и частоты вращения формующего шнека методом планирования эксперимента составлены математические модели (16) и (24).

Следующим необходимым этапом является статистическая оценка значимости коэффициентов уравнений регрессии по методике, подробно изложенной в источниках [4, 5].

Построчные дисперсии рассчитываются на основе матрицы планирования:

$$D(\bar{A}_j) = \frac{1}{m-1} \sum_{q=1}^m (\bar{A}_j - A_j^{(q)})^2, \quad (25)$$

где m – число повторений опытов при одном и том же j ($m = 3$); q – номер результата опыта ($q = 1 \dots 3$).

Дисперсия воспроизводимости рассчитывается как средняя арифметическая из построчных дисперсий всех N вариантов опытов:

$$D(A) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N D(\bar{A}_j). \quad (26)$$

Дисперсия среднего значения

$$D(\bar{A}) = \frac{1}{m} D(A). \quad (27)$$

Дисперсия коэффициентов регрессии

$$D(b_k) = \frac{1}{N} D(\bar{A}). \quad (28)$$

Ошибка коэффициентов регрессии

$$\sigma(b_k) = \sqrt{D(b_k)}. \quad (29)$$

Оценка значимости коэффициентов регрессии производится на основе неравенства

$$|b_k| > \sigma(b_k) t_p(f), \quad (30)$$

где $t_p(f) = 2,31$ – коэффициент Стьюдента для достоверности $P = 95\%$ и числа степеней свободы $f = N(m-1) = 8$ [4].

Если выполняется неравенство (30), то все коэффициенты регрессии значимы на уровне достоверности $P = 95\%$.

Для результатов планирования экспериментов в первой области (см. табл. 1) определены:

построчные дисперсии:

$$D_1(\bar{A}_j) = \frac{1}{2} [(1,20212 - 1,10435)^2 + (1,20212 - 1,3128)^2 + (1,20212 - 1,18921)^2] = 0,01094;$$

$$D_2(\bar{A}_j) = \frac{1}{2} [(3,13286 - 3,4567)^2 + (3,13286 - 3,0874)^2 + (3,13286 - 2,85448)^2] = 0,09222;$$

$$D_3(\bar{A}_j) = \frac{1}{2} [(0,87895 - 0,7989)^2 + (0,87895 - 0,8743)^2 + (0,87895 - 0,963659)^2] = 0,00681;$$

$$D_4(\bar{A}_j) = \frac{1}{2} [(1,67256 - 1,7084)^2 + (1,67256 - 1,5836)^2 + (1,67256 - 1,72568)^2] = 0,00601;$$

дисперсия воспроизводимости

$$D(A) = \frac{1}{4}(0,01094 + 0,09222 + 0,00681 + 0,00601) = 0,029;$$

дисперсия среднего значения

$$D(\bar{A}) = \frac{1}{3} \cdot 0,029 = 0,00967;$$

дисперсия коэффициентов регрессии

$$D(b_k) = \frac{1}{4} \cdot 0,00967 = 0,00242;$$

ошибка коэффициентов регрессии

$$\sigma(b_k) = \sqrt{0,00242} = 0,04919.$$

Для того чтобы коэффициенты регрессии были значимыми на уровне достоверности $P = 95\%$, должно выполняться неравенство $|b_k| > (b_k)t_p(f) = 0,04919 \cdot 2,31 = 0,11363$.

Тогда

$$\begin{aligned} |b_0| &= 1,72162 > 0,11363 - \text{значим;} \\ |b_1| &= 0,68109 > 0,11363 - \text{значим;} \\ |b_2| &= 0,44587 > 0,11363 - \text{значим;} \\ |b_{12}| &= 0,28428 > 0,11363 - \text{значим.} \end{aligned}$$

Таким образом, в выражении (16) все коэффициенты регрессии являются значимыми на уровне достоверности $P = 95\%$.

Для результатов планирования экспериментов во второй области (см. табл. 2) определены:

построчные дисперсии:

$$\begin{aligned} D_1(\bar{A}_j) &= \frac{1}{2}[(0,878953 - 0,8567)^2 + (0,878953 - 0,9312)^2 + (0,878953 - 0,84896)^2] = \\ &= 0,00207; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} D_2(\bar{A}_j) &= \frac{1}{2}[(1,67256 - 1,72356)^2 + (1,67256 - 1,6074)^2 + (1,67256 - 1,68672)^2] = \\ &= 0,00353; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} D_3(\bar{A}_j) &= \frac{1}{2}[(0,99803 - 1,02674)^2 + (0,99803 - 0,9457)^2 + (0,99803 - 1,02165)^2] = \\ &= 0,00206; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} D_4(\bar{A}_j) &= \frac{1}{2}[(3,0417 - 2,9655)^2 + (3,0417 - 2,88427)^2 + (3,0417 - 3,27533)^2] = \\ &= 0,04259; \end{aligned}$$

дисперсия воспроизводимости

$$D(A) = \frac{1}{4}(0,00207 + 0,00353 + 0,00206 + 0,04259) = 0,01256;$$

дисперсия среднего значения

$$D(\bar{A}) = \frac{1}{3} \cdot 0,01256 = 0,00419;$$

дисперсия коэффициентов регрессии

$$D(b_k) = \frac{1}{4} \cdot 0,00419 = 0,00105;$$

ошибка коэффициентов регрессии

$$\sigma(b_k) = \sqrt{0,00105} = 0,0324.$$

Для того чтобы коэффициенты регрессии были значимы на уровне достоверности $P = 95 \%$, должно выполняться неравенство

$$|b_k| > (b_k)t_p(f) = 0,0324 \cdot 2,31 = 0,0748.$$

Тогда

$$|b_0| = 1,64781 > 0,0748 - \text{значим};$$

$$|b_1| = 0,70932 > 0,0748 - \text{значим};$$

$$|b_2| = 0,37205 > 0,0748 - \text{значим};$$

$$|b_{12}| = 0,31252 > 0,0748 - \text{значим}.$$

Таким образом, в выражении (24) все коэффициенты регрессии являются значимыми на уровне достоверности $P = 95 \%$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Производство кускового торфа необходимо организовывать с наименьшими энергозатратами [6]. Расчет энергоемкости формования кускового торфа не только в процессе его производства, но и на стадии проектирования машин и процессов позволит оптимизировать затраты и ресурсы, а также создавать машины, работающие в рациональных режимах [7, 8]. По результатам работы можно сделать следующие выводы.

1. Учитывая характер полученных зависимостей энергоемкости формования кускового торфа от коэффициента напора и частоты вращения шнека [1, 2], для получения двухфакторной математической модели и повышения ее точности все поле экспериментальной зависимости следует разбить на две области: от минимальной до средней частоты вращения шнека [55,81; 183,28] и от средней до максимальной [183,28; 429,86], об/мин.

2. Получены математические модели (16) и (24), описывающие зависимость энергоемкости формования кускового торфа от коэффициента напора и частоты вращения шнека для двух областей скорости вращения шнека.

3. Оценка значимости коэффициентов полученных уравнений регрессии показала, что все они являются значимыми на уровне достоверности $P = 95 \%$.

4. Анализ значений коэффициентов в уравнениях регрессии показывает, что коэффициент напора сильнее влияет на энергоемкость, чем частота вращения шнека.

ЛИТЕРАТУРА

1. Яблонев А.Л., Гусева А.М. Определение энергоемкости процесса формирования кускового торфа. *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2019. № 1. С. 36–45.
2. Яблонев А.Л., Гусева А.М. Экспериментальное обоснование рациональных режимов производства кускового торфа. *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2019. № 2. С. 163–171. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-02-0-163-171.
3. Яблонев А.Л., Гусева А.М. О корреляционной связи плотности и прочности на изгиб кускового торфа, получаемого в процессе формирования шнековым прессом. *Научно-технический вестник Поволжья*. 2019. № 1. С. 62–65.
4. Богатов Б.А., Копенкин В.Д. Математические методы в торфяном производстве. М.: Недра. 1991. 240 с.
5. Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. Теория вероятностей и ее инженерные приложения. М.: Наука. 1988. 480 с.
6. Лазарев А.В., Корчунов С.С. и др. Справочник по торфу. М.: Недра. 1982. 760 с.
7. Misnikov O.S. Basic Technologies and Equipment Used for Peat Deposits Development in Foreign Countries. *Web of Conferences «III-d International Innovative Mining Symposium»*. V. 41. 2018. P. 01046. DOI: 10.1051/e3sconf/20184101046.
8. Панов В.В., Мисников О.С., Купорова А.В. Проблемы и перспективы развития торфяного производства в Российской Федерации. *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2017. № 5. С. 105–117.

FULL FACTORIAL EXPERIMENT ON DETERMINATION OF SOD PEAT FORMING ENERGY INTENSITY DEPENDENCE UPON COEFFICIENT OF PRESSURE AND MOLDING OF THE SCREW ROTATION FREQUENCY

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

Received during previously held research intensity dependence of formation of peat from the diameter of the nozzle and the forming of screw rotation speed revealed that for all the studied modes there is a minimum intensity when per forming area of 220–320 RPM screw. By the method of planning a two-factor experiment, response functions were constructed, which describe the dependence of the intensity of molding on the head pressure factor and screw rotation frequency for the two explored zones, limited by the screw rotation frequency. The calculation was made and the significance of the coefficients of the regression equations was analyzed. The results showed that all the coefficients in the equations are significant at confidence level $P = 95\%$, and changing the coefficient of pressure more affects the intensity of change of energy intensity, than changing the rotational speed of the screw.

Keywords: sod peat, forming, energy intensity, screw press, the coefficient of pressure, rotational speed, the regression equation, reliability.

REFERENCES

1. Yablonev A.L., Guseva A.M. Determination of the Intensity of the Molding Process of Sod Peat. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya «Tehnicheskiye nauki»*. 2019. V. 1. No 1, pp. 36–45. (In Russian).
2. Yablonev A.L., Guseva A.M. Experimental Substantiation of Rational Modes of Production of Sod Peat. *Gornyy Informatsionno-analiticheskiy Byulleten*. 2019. No 2, pp. 163–171. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-02-0-163-171. (In Russian).
3. Yablonev A.L., Guseva A.M. On the Correlation of Sod Peat Density and Flexural Strength Produced in the Screw Press Formation. *Nauchno-tehnicheskiy vestnik Povolzhya*. 2019. No 1, pp. 62–65. (In Russian).
4. Bogatov B.A., Kopenkin V.D. *Matematicheskiye metody v torfyanom proizvodstve* [Mathematical Methods in Peat Production]. Moscow: Nedra. 1991. 240 p. (In Russian).
5. Ventzel Ye.S., Ovcharov L.A. *Teoriya veroyatnostey i yeyo inzhenerniye prilogeniya* [Theory of Probability and its Engineering Applications]. Moscow: Nauka. 1988. 480 p. (In Russian).
6. Lazarev A.V., Korchunov S.S., etc. *Spravochnik po torfu*. Moscow: Nedra. 1982. 760 p. (In Russian).
7. Misnikov O.S. Basic Technologies and Equipment Used for Peat Deposits Development in Foreign Countries. *Web of Conferences «III-d International Innovative Mining Symposium»*. V. 41. 2018, pp. 01046. DOI: 10.1051/e3sconf/20184101046 (In Russian).
8. Panov V.V., Misnikov O.S., Kuporova A.V. Problems and Prospects of Development of Peat Production in the Russian Federation. *Gornyy Informatsionno-analiticheskiy Byulleten*. 2017. No 5, pp. 105–117. (In Russian).

КОМПЛЕКСНАЯ ДИАГНОСТИКА КАК ОСНОВА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ТОРФЯНОЙ МАШИНЫ

И.В. ГОРЛОВ, д-р техн. наук

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

Представлены результаты анализа потока отказов торфяных машин, установлены их основные причины. Рассмотрены возможные методы диагностики технического состояния торфяных машин и предложены средства для реализации комплексной диагностики. В основе диагностической системы предлагается использовать устройство для комплексной диагностики технического состояния, разработанное в компании «Интранском». Контроль над состоянием подшипниковых узлов осуществляется на основе измерения двух диагностических параметров – температуры и виброакустического сигнала. Приводятся основные характеристики данного устройства, его структура и принцип действия отдельных блоков. Представлены результаты вибродиагностического исследования модели фрезерного агрегата и предложена методика определения диагностического параметра, которая может быть использована при прогнозировании остаточного ресурса различных узлов торфяных машин.

Ключевые слова: надежность, отказ, техническое состояние, диагностика, износ, ремонт, экспериментальное моделирование.

ВВЕДЕНИЕ

Анализ технической эксплуатации торфодобывающих машин выявил возможность использования существенных технологических резервов при условии совершенствования организации процесса сервисных работ, что позволит повысить производительность и интенсифицирует добычу торфяной продукции. Необходимость внедрения оперативного управления планированием таких работ и анализ технологических процессов добычи связан с тем, что торфяное производство обусловлено специфическими особенностями – сезонностью и глобальной зависимостью от погодных условий.

Реализация годового объема добычи торфа в течение 40...60 благоприятных по метеорологическим условиям дней в большой мере зависит от обоснованности с научной точки зрения организации процесса технической эксплуатации торфяных машин. В сезоне добычи по значительной части дней и циклов возможно изменение метеорологических условий в большом диапазоне, что требует оперативного управления процессом добычи и обслуживания машин, которое должно основываться на гибкой системе, позволяющей с высокой эффективностью проводить регламентные работы при быстро изменяющихся погодных условиях [1, 2]. Безотказная эксплуатация торфяных машин (ТМ) на месторождении в сезоне добычи, а также снижение совокупных затрат на текущие ремонты и обслуживание в значительной мере зависят от правильного выбора и требуемой точности диагностирования измеряемых параметров, а также от скорости их изменений в процессе технической эксплуатации.

Использование информационных технологий при прогнозировании остаточного ресурса основных агрегатов торфяных машин может существенно повысить их безотказность в сезон добычи. Для диагностирования узлов и механизмов торфяных

машин наиболее информативным способом определения технического состояния являются анализ температуры и вибродиагностика [3].

При использовании термодиагностики предусматривается возможность получения информации о температуре контролируемого узла с помощью датчиков, встроенных в корпуса подшипниковых букс. Такая система контроля должна обеспечивать сбор и обработку полученной информации, ее сохранение и сигнализацию об опасных нагревах подшипников. Используемые в настоящее время системы контроля температуры в большинстве случаев обеспечивают только ее отслеживание и оповещают оператора машины о критическом состоянии, что не всегда позволяет проводить анализ развития повреждения подшипников.

Виброакустический метод диагностирования отличается от многих других методов большей универсальностью, мгновенной реакцией на даже незначительные изменения в состоянии контролируемого объекта. Многообразие физической природы возникновения вибраций, широкий частотный спектр обеспечивают высокую информативность в процессе контроля диагностируемых параметров узлов торфяных машин.

С помощью виброакустического метода диагностирования можно достоверно определять техническое состояние подшипников, зубчатых механизмов, вращающихся роторов и многого другого, что позволяет контролировать качество изготовления, ремонта и предотвращать разрушения, обнаруживаемые на ранней стадии зарождения дефекта. При диагностировании механизмов торфяных машин важнейшей задачей является выделение из вибрационного процесса информативных составляющих и формирование из них диагностических параметров.

Один из наиболее простых виброакустических параметров – общий уровень вибрации в диагностируемых зонах машин. Для диагностирования механизмов по общему уровню вибрации необходимо знать среднее значение общего уровня для их номинального и предельного состояний. Сравнительно несложными электронными приборами типа ЭМДП по общему уровню вибрации в контролируемых зонах машины можно диагностировать многие механизмы. Однако погрешность определения фактических параметров будет достаточно высокой. Цель настоящей работы – выполнить анализ причин отказов торфяных машин и предложить средства для реализации комплексной диагностики их технического состояния.

АНАЛИЗ ОТКАЗОВ ТОРФЯНЫХ МАШИН

Исследование надежности ряда торфяных машин проводилось в ОАО «Васильевский Мох». Машины эксплуатировались на производственных участках, расположенных на верховом типе залежи со средней степенью разложения торфа 25 %, объемной пнистостью 1...2 %, второго года эксплуатации. Условная влажность собираемого торфа 40 %, глубина фрезерования залежи 0,011 м, эксплуатационная влажность 80 %.

Были рассмотрены три группы машин: в первую входили валкователь ВТ-9.8, два фрезерных барабана Ф-6,5, четыре уборочные машины МТФ-43А, ворошилка ВС-9,6; во вторую и третью – по четыре уборочные машины МТФ-43А-К, два фрезерных барабана Ф-6,5, ворошилка ВС-9,6 и валкователь ВТ-9.8. При эксплуатации для каждого типа машин фиксировалось количество отказов, рассчитывались статистические характеристики эксплуатации (время безотказной работы, среднее квадратическое отклонение наработки на отказ, среднее время восстановления с учетом ожидания ремонта) [4]. Отказы условно делились на три группы (первая для отказов, устраняемых в течение часа, вторая – в течение 8 часов, третья – более 8 часов).

При эксплуатации большинства уборочных машин МТФ-43 происходили остановки элеватора из-за заклинивания древесными включениями в среднем один раз на 8 часов работы. В ряде случаев происходили отказы предохранительных муфт элеваторов (в среднем один на 14 часов работы машины). Отказы были как первой группы сложности (требовалась регулировка фрикционной муфты), так и второй группы (требовалась замена фрикционных накладок и других деталей механизма).

Также фиксировался сход цепей элеваторов со звездочек из-за попадания древесных остатков (один на 26 часов работы), отказы карданных передач (один на 34 часа работы), поломка муфты включения механизма выгрузки (одна на 46 часов работы), разрыв цепи элеватора (один на 65 часов работы) и др. Отказы машин, выработавших ресурс свыше 1 000 моточасов, происходили более чем в два раза чаще, чем у машин, выработавших ресурс менее 400 моточасов. Так как большинство отказов связано с попаданием древесных остатков в торфяной залежи, то наступление таких отказов можно считать случайным, что требует оперативной диагностики и последующего анализа технического состояния машины.

ДИАГНОСТИКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ МАШИН

Протекающие в различных кинематических парах и системах торфяных технологических машин динамические процессы могут существенно отличаться своими индивидуальными свойствами, такими как момент появления ударного импульса, частота повторения и интенсивность взаимодействия. Благодаря этим индивидуальным свойствам можно легко с помощью программных средств выделить полезную составляющую из вибрационного сигнала, при этом используются различные методы локализации:

временной (выделение сигнала во времени, например в цикле работы двигателя);
частотной;

амплитудной селекции;

перераспределение нагрузки на проверяемый механизм с целью повышения уровня полезного сигнала и снижения помех от непроверяемых механизмов.

Для точной диагностики очень важно правильно установить датчики, выявляя наиболее эффективные места установки вибропреобразователя, связанные с контролируемым узлом. Направленность чувствительного элемента вибропреобразователя относительно возмущающей силы служит эффективным способом повышения относительного уровня полезного сигнала, что особенно важно при диагностировании сравнительно простыми малогабаритными электронными приборами. В качестве вибрационного параметра можно использовать перемещение, скорость или ускорение в зависимости от целесообразности, удобства измерения данного параметра, чувствительности метода и возможности измерительного устройства.

Для выявления наиболее информативных диагностических параметров процесса изменения состояния фрезерного агрегата в зависимости от различных факторов воздействия была создана физическая модель в масштабе 1:5. Исследования проводились в три этапа. На первом этапе испытания проходили на упомянутой установке с использованием новых опорных подшипников, на втором этапе испытания проходили с частично изношенными подшипниками качения, на третьем – с изношенными подшипниками.

Исследование показало, что состояние фрезерного агрегата в целом можно оценивать по суммарной величине виброакустического сигнала в случае машин с относительно небольшой наработкой, а при значительном росте показателя требуется проводить анализ с разделением по частотам для выявления его источника.

Исследования на втором и третьем этапе показали, что по мере износа подшипника возрастает амплитуда колебаний на высоких частотах, а также растет общий уровень виброакустического сигнала, который может быть использован для общей диагностики агрегата. На каждом этапе исследования на основе данных об изменении суммарного уровня шума рассчитывался коэффициент α , характеризующий степень изменения диагностируемого параметра от наработки (на первом этапе $\alpha = 1,1$, на втором 1,2, на третьем 1,7):

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

где ΔX_i и ΔX_{i+1} – изменение виброакустического сигнала при наработке t_i и t_{i+1} .

Так же рассчитывался остаточный ресурс опорного подшипника

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

и коэффициент динамики изменения диагностируемого параметра

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

Динамика изменения виброакустического сигнала изношенных подшипников была чрезмерно высокая, значение коэффициента K_{ci} в три с половиной раза превышает величину изменения виброакустического сигнала для новых подшипников, прогнозировать остаточный ресурс в этом случае сложно, требуется замена подшипника. При периодическом диагностировании фрезерного агрегата не всегда можно достаточно точно выявить интервал времени, в котором подшипник переходит в зону интенсивного износа, когда отказ трудно прогнозируем и требуется замена узла, даже если не достигнуто предельное состояние по наработке. Помочь решить эту проблему может система непрерывного сбора диагностической информации по нескольким контролируемым параметрам [5]. Например, для повышения точности определения остаточного ресурса можно использовать дополнительный анализ технического состояния узлов торфяных машин с помощью контроля температурного режима основных узлов. При проведении исследования нескольких диагностических параметров появляется возможность выявления зависимостей между ними. Это обеспечит получение непрерывной информации об изменении технического состояния машины и позволит в любой момент времени с достаточной точностью определить остаточный ресурс контролируемого узла.

УСТРОЙСТВО ДЛЯ КОМПЛЕКСНОЙ ДИАГНОСТИКИ

Для определения технического состояния узлов торфяных машин может быть использован аналог устройства комплексной диагностики состояния буксовых узлов пассажирских вагонов, разработанного в компании «Интранском». Анализ состояния подшипникового узла буксы осуществляется с помощью системы контроля температуры, дополненной виброакустическим модулем, с применением современных аппаратных и вычислительных средств. Для осуществления возможности виброакустического контроля был разработан специально аппаратный набор,

включающий в себя комплект датчиков и вычислительный блок. Конструктивная топология этой системы представлена на рис. 1.

Связующим звеном всей системы является электронный блок температурного контроля буксовых узлов (БТКБУ). Он выполняет сбор, обработку и анализ данных, полученных от групп датчиков с № 1 по № 4, а также сигнализацию неисправных состояний и взаимодействие с бортовым компьютером вагона через локальную вычислительную сеть.

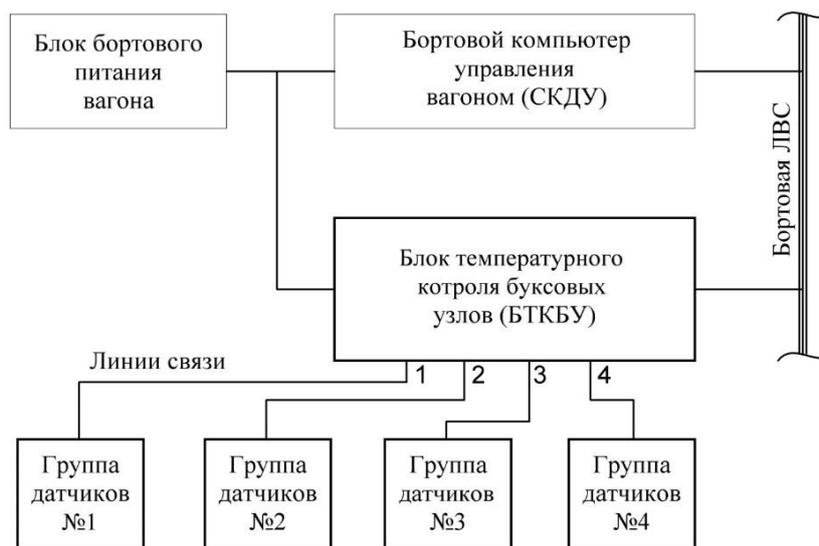


Рис. 1. Блок-схема комплекса температурного и виброакустического контроля и связь с бортовым компьютером

Среди важных особенностей системы – наличие цветного графического экрана с разрешением 640x480 точек, на который можно выводить детальную информацию о состоянии буксовых узлов, а также проводить визуальный анализ температуры и вибрации, выводимых в виде графиков в реальном времени или из сохраненных данных. Кроме того, наличие сенсорного экрана в сочетании с интеллектуальным интерфейсом позволяет быстрее и проще подготавливать обслуживающий персонал к работе с данным блоком. Встроенная энергонезависимая память в зависимости от размера установленного в него накопителя может сохранять данные о температуре и вибрациях за период более года.

Датчики, устанавливаемые на буксовые узлы колесных пар, связаны с центральным блоком через четыре независимые линии связи. Разделение линий связи на четыре группы позволяет снизить влияние помех, увеличить пропускную способность линии и повысить надежность системы. В состав датчика входит вычислительный модуль, датчик температуры и датчик ускорения по осям. Электронная часть датчиков выполнена из компонентов, способных работать в широком интервале температур (от –40 до +125 градусов по Цельсию).

На рис. 2 изображена блок-схема функциональной структуры системы. Разработанная система с применением термического и виброакустического анализа состоит из следующих функциональных подсистем:

- датчики, устанавливаемые в буксовые узлы;
- центральный вычислительный блок, устанавливаемый в специально отведенном месте;
- кабельные линии связи датчиков.

Термочувствительный элемент датчика располагается в теплопроводном колпачке корпуса датчика, а акселерометр и вычислительный модуль – в основном корпусе датчика. Датчик устанавливается непосредственно в корпус буксового узла и жестко фиксируется в определенном положении. Вычислительный модуль системы диагностики производит периодический опрос датчика температуры и акселерометра при подаче питания. Значения измеренной температуры сохраняются в градусах Цельсия, а виброакустический сигнал может формироваться либо в дискретных значениях амплитуды по времени, либо в спектральный сигнал.

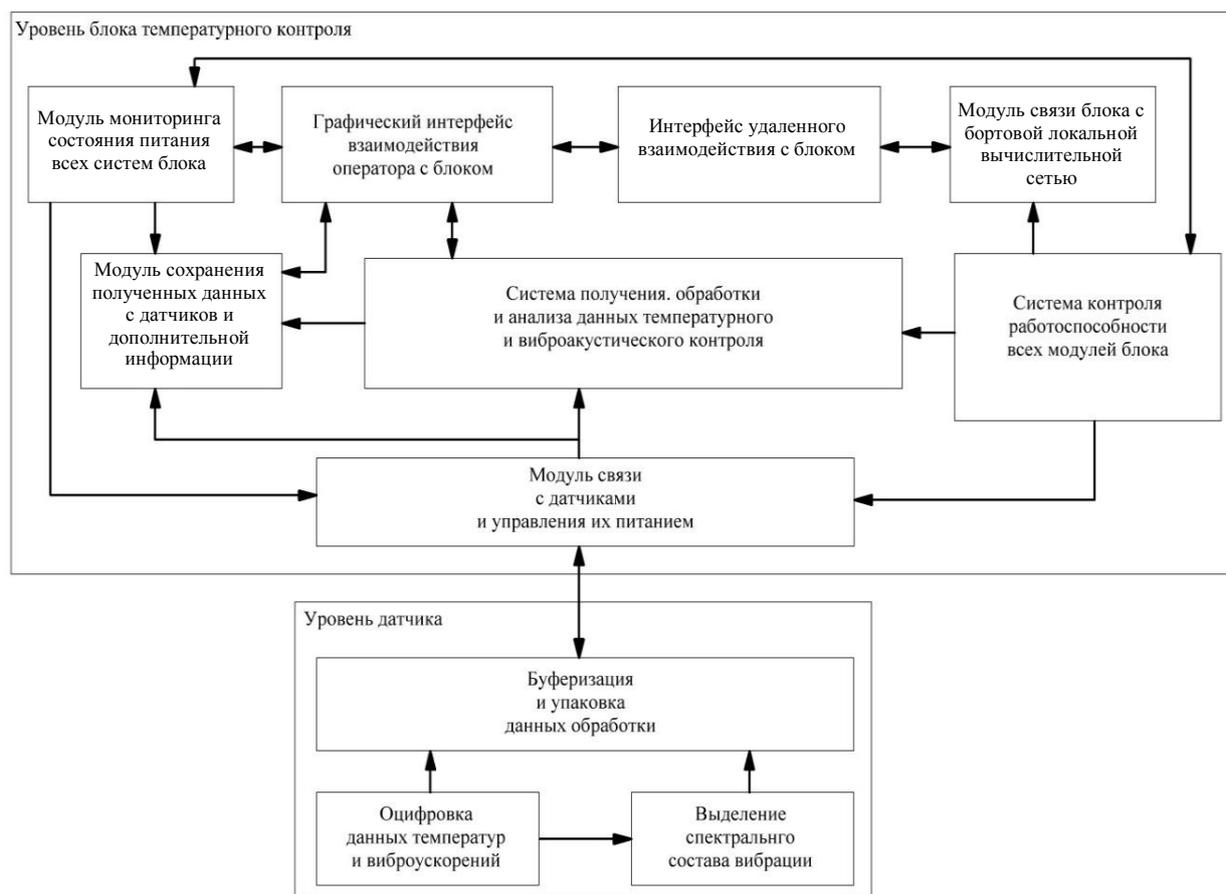


Рис. 2. Блок-схема функциональной структуры системы

Вычислительный модуль выполнен на базе 32х-битного ARM-микроконтроллера. Линия связи датчиков с центральным блоком однопроводная полудуплексная, скорость обмена настраиваемая.

Информация о состоянии буксовых узлов отображается на дисплее блока, а также дублируется дополнительной световой и звуковой сигнализацией. Блок имеет возможность связи с бортовой локальной вычислительной сетью, что позволяет контролировать состояние буксовых узлов удаленно. Настройка и обновление программного обеспечения может производиться непосредственно на блоке через USB интерфейс с помощью компьютера или через локальную вычислительную сеть удаленно. Для сохранения хронологии данных с датчиков в блоке установлена энергонезависимая память в виде SD-карты памяти. Количество устанавливаемых датчиков, контролируемых системой диагностики, практически любое, а ограничивается только быстродействием шины передачи данных.

Для расширения возможностей системы комплексной диагностики можно подключить дополнительные устройства, осуществляющие контроль над функционированием машины по дополнительным параметрам с использованием других датчиков. При этом конструктивных изменений в сам управляющий блок вносить не требуется, необходимо только заменить программное обеспечение с использованием существующих интерфейсов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование комплексной диагностики, осуществляемой непосредственно в процессе эксплуатации машины, позволяет в любой момент времени получать данные о состоянии контролируемых узлов по нескольким каналам, что обеспечивает многостороннюю оценку технического состояния диагностируемого объекта [6]. Особенно это важно для торфяных машин, состояние которых может интенсивно изменяться в короткие интервалы времени из-за случайного характера воздействия окружающей среды на узлы и механизмы техники.

Оценка технического состояния машины по нескольким диагностическим параметрам одновременно позволяет повысить точность прогнозирования достижения предельного состояния наиболее ответственных узлов и уменьшить количество отказов, возникающих при эксплуатации торфяных машин на месторождении.

Применение комплексной системы диагностирования в сочетании с информационными технологиями обеспечивает анализ изменения контролируемых параметров на всем интервале эксплуатации для каждой машины индивидуально, что позволяет учитывать особенности торфяных машин, достигая при этом наивысшей эффективности их использования в сезон добычи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Михайлов А.В., Селеннов В.Г. Торфяная промышленность России. *Горное оборудование и электромеханика*. 2009. № 9. С. 22–28.
2. Купорова А.В., Смирнов В.И. Обоснование проектного количества циклов при расчете программы добычи фрезерного торфа. *Процессы и средства добычи и переработки полезных ископаемых*. Сборник трудов Международной научно-технической конференции, посвященной 80-летию со дня рождения заслуженного работника высшей школы Беларуси, д.т.н., проф. Кислова Н.В., 17–20 апреля 2012. Минск: БНТУ. 2012. С. 67–72.
3. Ковалев Н.Г., Горлов И.В. Анализ состояния фрезерного агрегата торфяной машины на основе вибродиагностики. *Инновационное развитие АПК России на базе интеллектуальных машинных технологий*. Сборник научных докладов Международной научно-технической конференции. 2014. С. 412–417.
4. Швалева А.В. Методы математической статистики в технических исследованиях. *Молодой ученый*. 2012. № 3. С. 427–430.
5. Салихов Р.Ф., Чудова Т.М., Валиев Р.Р. Повышение надежности строительных и дорожных машин путем совершенствования системы измерения наработки. *Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии*. 2016. № 2 (48). С. 25–31.
6. Скрыпников А.В., Кондрашова Е.В., Бурмистрова О.Н., Яковлев К.А. Комплексная оценка надежности лесозаготовительных машин. *Современные проблемы науки и образования*. 2013. № 2. URL: <http://science-education.ru/ru/article/-/view?id=8537> (дата обращения: 24.02.2019).

COMPLEX DIAGNOSTICS AS A BASIS FOR FORECASTING THE TECHNICAL CONDITION OF THE PEAT MACHINE

I.V. GORLOV, Dr Sci

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

The article presents the results of the analysis of the flow of failures of peat machines, their main reasons are established. Possible methods for diagnosing the technical state of peat machines are considered and means for implementing complex diagnostics are proposed. At the heart of the diagnostic system it is proposed to use a device for comprehensive diagnostics of the technical condition, developed in the company Intranskom. Monitoring of the state of the bearing assemblies is carried out on the basis of measuring two diagnostic parameters — temperature and a vibroacoustic signal. The main characteristics of this device, its structure and the principle of operation of individual units are given. The results of the vibrodiagnostic study of the milling unit model are presented, and a method for determining the diagnostic parameter is proposed, which can be used in predicting the residual life of various peat-machine units.

Keywords: reliability, failure, technical condition, diagnostics, wear, repair, experimental modeling.

REFERENCES

1. Mikhaylov A.V., Selenov V.G. Peat industry of Russia. *Gornoye oborudovaniye i elektromekhanika*. 2009. № 9, pp. 22–28. (In Russian).
2. Kuporova A.V., Smirnov V.I. Justification of the design number of cycles in the calculation of the program of production of milled peat. *Protsessyi i sredstva dobychi i pererabotki poleznykh iskopaemykh*. Sat. Proceedings of scientific tech. conference dedicated to the 80th anniversary of the birth of the Honored Worker of the Higher School of Belarus, Ph.D., prof. N. Kislova, April 17–20, 2012. Minsk: BNTU. 2012, pp. 67–72.
3. Kovalev N.G., Gorlov I.V. Analysis of the state of the milling unit of the peat machine on the basis of vibrodiagnostics. *Collection of reports of the international scientific and technical conference «Innovatsionnoye razvitiye APK Rossii na baze intellektual'nykh mashinnykh tekhnologiy»*. 2014, pp. 412–417. (In Russian).
4. Shvaleva A.V. Methods of mathematical statistics in technical studies. *Molodoy uchenyy*. 2012. № 3, pp. 427–430. (In Russian).
5. Salikhov R.F., Chudova T.M., Valiev R.R. Increase the reliability of building and road machines by improving the measurement system of operating time. *Bulletin of the Siberian State Automobile and Highway Academy*. 2016. № 2 (48), pp. 25–31. (In Russian).
6. Skrypnikov A.V., Kondrashova E.V., Burmistrova O.N., Yakovlev K.A. Comprehensive assessment of the reliability of logging machines. *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya*. 2013. № 2. URL: <http://science-education.ru/ru/article/view?id=8537> (дата обращения: 24.02.2019). (In Russian).

ДВА МЕТОДА СИЛОВОГО И ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО РАСЧЕТА ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ФРЕЗЫ

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

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

Рассматриваются два метода решения задачи силового и энергетического расчета цилиндрической фрезы торфяных машин как класса горных машин – традиционный и алгоритмический. Традиционный метод расчета не отражает пульсации сил в процессе фрезерования, не позволяет количественно оценить различие в пульсации сопротивлений и мощностей для фрез с различным расположением ножей по поверхности фрезы, не может использоваться при поиске и обосновании оптимального варианта расположения ножей. Предлагаемый алгоритмический метод расчета позволяет получать закономерности изменения сопротивлений, действующих на отдельный нож фрезы в процессе срезания стружки, а также на плоскость резания и на фрезу в целом. Целесообразно использовать традиционный метод только при выполнении предварительных прикидочных расчетов при проектировании фрезерующих машин, а уточненные расчеты выполнять алгоритмическим методом – с использованием компьютера и разработанного программного обеспечения.

Ключевые слова: фрезерование торфяной залежи, фрезерующие машины, нож фрезы, мощность фрезерования, сопротивление резанию, толщина стружки, удельный расход энергии на резание.

ВВЕДЕНИЕ

Фрезерованием горной породы называют процесс разрушения породы фрезой. В горном деле фрезой называют многолезвийный режущий инструмент, приводимый во вращение жестко скрепленным с ним валом. В торфяных машинах как классе горных машин [1] используются фрезы для экскавации торфяной залежи, подготовки и профилирования поверхности торфяных полей. При проектировании торфяных фрезерующих машин выполняют силовой и энергетический расчет. Применение фрезерных машин актуально в современных открытых горных работах [2, 3], к которым относится и разработка торфяных месторождений. Целью настоящей статьи является описание методов расчета фрез торфяных машин, наиболее полно учитывающих силы, действующие на фрезу.

Традиционный метод решения задачи силового и энергетического расчета фрезы дает возможность вычислить средние значения действующих сопротивлений и мощностей, но не позволяет определить закономерности изменения этих величин во времени. Соответственно, традиционное решение не позволяет количественно оценить различие в пульсации сопротивлений и мощностей для фрез с различным расположением ножей по поверхности фрезы (зафиксированным в экспериментах), и следовательно, не может использоваться при поиске и обосновании оптимального варианта расположения ножей.

Нами предложен метод силового и энергетического расчета фрезы [4], не имеющий недостатков, присущих традиционному методу. В основе этого метода лежит представление о том, что сопротивления, действующие в любой момент времени со стороны фрезеруемого материала на фрезу, формируются из сопротивлений,

действующих на каждый нож, участвующий в резании материала в этот момент времени. В такой постановке задача определения сопротивлений, действующих на фрезу, сводится к задаче определения сопротивлений, действующих на отдельный нож фрезы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В результате силового и энергетического расчета фрезы определяются следующие параметры: N_F – мощность фрезерования; N_{BF} – мощность привода фрезы; M – момент сопротивления вращению фрезы; Q_X – сила сопротивления подаче; Q_Z – выталкивающая сила.

При традиционном методе силового и энергетического расчета фрезы [4–7] в качестве исходных используются следующие данные:

R – радиус фрезы (по концам ножей), м;

H – глубина фрезерования, м;

w – скорость подачи фрезы, м/с;

ω – угловая скорость вращения фрезы, 1/с;

Z_0 – количество ножей в плоскости резания, шт;

ψ – коэффициент, представляющий собой величину отношения выталкивающей силы к силе сопротивления резанию;

данные о ноже и фрезеруемом материале, позволяющие с использованием значения толщины срезаемой стружки δ вычислять удельный расход энергии на резание A .

В традиционном методе силового и энергетического расчета фрезы в качестве параметра, определяющего величину удельного расхода энергии на резание A , принято использовать среднюю толщину стружки, срезаемой ножом фрезы, δ_{cp} . Мощность фрезерования определяется как произведение секундной производительности фрезы на удельный расход энергии:

$$N_F = BHwA. \quad (1)$$

Величины M , N_{BF} , Q_X , Q_Z вычисляются через N_F с использованием координатного угла φ_a . Угол φ_a определяет положение точки приложения равнодействующей сил реакции со стороны фрезеруемого материала к поверхности фрезы.

Известно, что текущее значение толщины стружки, срезаемой ножом фрезы, по длине его пути при резании меняется нелинейно. Удельный расход энергии на резание A от толщины стружки зависит тоже нелинейно. Соответственно, значения удельного расхода энергии и средняя толщина срезаемой стружки δ_{cp} не должны совпадать с аналогичными значениями, подсчитанными как средние по длине срезаемой стружки с учетом закона ее изменения. То есть использование δ_{cp} как параметра, в значительной мере определяющего энергозатраты на резание, уже предопределяет погрешность в расчете энергозатрат и, следовательно, мощности фрезерования.

Текущее значение толщины стружки, срезаемой ножом фрезы, непрерывно изменяется во времени. Нож фрезы взаимодействует с фрезеруемым материалом только в пределах дуги контакта – на части полного оборота ножа относительно оси фрезы. Изменение толщины стружки и периодичность взаимодействия ножа с фрезеруемым материалом являются причиной изменения во времени сопротивлений, действующих на нож фрезы. Сопротивления, действующие на фрезу в любой момент времени, складываются из суммы сопротивлений, действующих в этот момент времени

на все ножи фрезы, взаимодействующие с фрезеруемым материалом. Соответственно, суммарные сопротивления, действующие на фрезу, также оказываются величинами, изменяющимися во времени.

При использовании понятия удельной силы сопротивления резанию для определения сопротивлений, действующих на нож, нужно знать величину и направление скорости резания, а также размеры поперечного сечения срезаемой стружки. При заданной ширине ножа определение площади поперечного сечения стружки сводится к определению толщины стружки.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для задачи вычисления текущего значения толщины стружки, срезаемой ножом фрезы, найдено алгоритмическое решение [8]. Это решение является основой алгоритма вычисления текущих сопротивлений, действующих на нож фрезы, а также на плоскость резания и на фрезу в целом [9]. Этот алгоритм и является предложенным нами методом силового и энергетического расчета фрезы. Соответственно, этот метод расчета предлагаем называть алгоритмическим. При алгоритмическом методе расчета используются те же исходные данные, что и при традиционном (см. выше) и дополнительные параметры: B – ширина захвата ножа; N_{PL} – количество плоскостей резания на фрезе.

При постоянном режиме работы фрезы полный цикл изменения сопротивлений происходит в течение одного оборота фрезы. Алгоритмический метод позволяет вычислить сопротивления, действующие на нож фрезы, на плоскость резания и на фрезу в целом, для N_0 дискретных положений фрезы во вращательном движении в пределах одного оборота. Шаг дискретизации положений начинается с момента начала срезания стружки первым ножом фрезы. Номера положений увеличиваются в направлении вращения фрезы.

Результатом вычисления сопротивлений, действующих на нож в течение оборота, являются массивы Q_{XR} [1: N_0], Q_{ZR} [1: N_0], M_R [1: N_0] – значения силы сопротивления подаче, выталкивающей силы и момента сопротивления вращению, вычисленные для каждого из N_0 положений ножа. Сопротивления, действующие в течение оборота в плоскости резания, представляются, соответственно, массивами Q_{XP} [1: N_0], Q_{ZP} [1: N_0], M_P [1: N_0]. Результатом расчета сопротивлений, действующих на фрезу в целом, являются массивы Q_X [1: N_0], Q_Z [1: N_0], M [1: N_0].

В качестве числовых характеристик сопротивлений, действующих на фрезу, используются математические ожидания сопротивлений $\bar{Q}_X, \bar{Q}_Z, \bar{M}$ и их средние квадратические отклонения $\sigma_{Q_X}, \sigma_{Q_Z}, \sigma_Q$.

Мощность привода фрезы вычисляется по формуле

$$N_{BF} = \bar{M}\omega. \quad (2)$$

Мощность фрезерования вычисляется в соответствии с теоремой о мощности фрезерования [10] по формуле

$$N_F = N_{BF} + \bar{Q}_X w. \quad (3)$$

Различают две схемы работы фрезы – фрезерование «встречное» и фрезерование «попутное». При попутном фрезеровании нож фрезы срезает стружку, двигаясь сверху вниз. При встречном фрезеровании нож фрезы срезает стружку, двигаясь снизу вверх. Алгоритмы силового и энергетического расчета для этих двух схем работы фрезы

несколько отличаются. Алгоритмы реализуются компьютерными программами [11] FRESA4.BAS и FREZA5.BAS. Программы написаны на языке BASIC и предназначены для использования в интегрированной среде QBASIC.

Программа FREZA4.BAS применяется для силового и энергетического расчета фрез, работающих по схеме встречного фрезерования. Программа FREZA5.BAS применяется для силового и энергетического расчета фрез, работающих по схеме попутного фрезерования. Взаимодействие пользователя с программой происходит в режиме диалога. Интерфейс обеих программ совершенно одинаков. Значение N_0 определяется в режиме диалога пользователя с программой с таким расчетом, чтобы сопротивления, вычисленные для N_0 дискретных положений фрезы, давали достаточно полное представление о закономерностях их изменения в течение оборота.

Изменения в течение оборота сопротивлений, действующих на отдельный нож фрезы, а также сопротивлений, действующих в одной плоскости резания, и сопротивлений, действующих на фрезу в целом, могут быть выведены на экран дисплея в виде графиков. Эти графики легко документируются в виде копий экрана.

С целью детального анализа процесса изменения сопротивлений, действующих на нож фрезы в процессе срезания стружки, элементы массивов Q_{XR} [1: N_V], Q_{ZR} [1: N_V], M_R [1: N_V] можно вывести в файл RESSIL.DAT. При необходимости детального анализа процесса изменения сопротивлений, действующих на фрезу в течение оборота, элементы массивов Q_X [1: N_0], Q_Z [1: N_0], M [1: N_0] могут быть выведены в файл FRESRES.DAT. Значения мощности привода фрезы N_{BF} , мощности фрезерования N_F и числовые характеристики сопротивлений, действующих на фрезу в течение оборота, могут быть выведены и на дисплей, и на принтер.

Алгоритмический метод не имеет недостатков, присущих традиционному методу. Поэтому представляет интерес сравнение результатов расчетов по двум вариантам: с использованием традиционного метода и с использованием алгоритмического. При этом отличие результата, полученного с использованием традиционного метода, от результата, полученного с использованием алгоритмического метода, логично считать погрешностью традиционного метода. Традиционный метод расчета не отражает пульсации сил в процессе фрезерования, поэтому единственно возможным сравнением является сравнение сил и мощностей, полученных с использованием традиционных методов, со средними значениями соответствующих показателей, полученных с использованием алгоритмического метода.

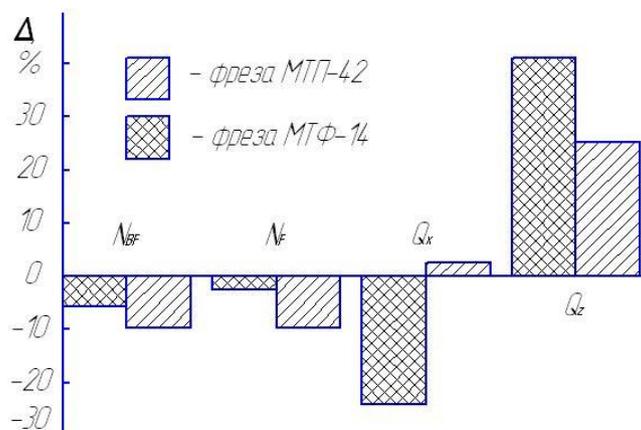
В настоящее время традиционные методы расчета фрез глубокого и поверхностно-послойного фрезерования несколько отличаются [12]. Поэтому расчеты по двум вариантам были выполнены для фрезы МТП-42, работающей в режиме глубокого фрезерования, и фрезы МТФ-14, работающей в режиме поверхностно-послойного фрезерования. Погрешности результатов вычислялись по формуле

$$\Delta = \frac{|P_T| - |P_a|}{|P_a|} \cdot 100, \quad (4)$$

где $|P_T|$ – абсолютное значение показателя (силы, мощности), полученного для данной фрезы и режима фрезерования с использованием традиционного метода; $|P_a|$ – абсолютное значение математического ожидания соответствующего показателя, полученного с использованием алгоритмического метода.

Расчеты и сравнения показали (рисунок), что для фрезы МТП-42 традиционный метод обеспечивает вычисление мощности привода фрезы N_{BF} , мощности фрезерования N_F , силы сопротивления подаче Q_X , выталкивающей силы Q_Z с

погрешностями, соответственно равными $-8,6$; $-8,6$; $2,5$; $25,3$ %. Для фрезы МТФ-14 погрешности при вычислении N_{BF} , N_F , Q_x , Q_z оказались соответственно равными -5 ; $-2,4$; $-24,7$; 41 % (рисунок).



Погрешности результатов при использовании традиционных методов расчета

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Традиционные методы силового и энергетического расчета фрез торфяных машин дают несколько заниженные значения мощностей. Этот факт объясним. Известно, что удельная сила сопротивления резанию (и удельный расход энергии на резание) нелинейно возрастает с уменьшением толщины стружки. В процессе срезания стружки ножом фрезы толщина стружки непрерывно изменяется – возрастает от нуля до максимального значения и снова уменьшается до нуля. В традиционных методах расчет сил и мощностей ведется по средней толщине стружки, срезаемой ножом фрезы. Естественно, что при этом значения удельной силы сопротивления резанию, удельного расхода энергии на резание и, соответственно, мощностей оказываются заниженными.

Значения силы Q_z при традиционных методах расчета оказывается значительно больше (а для фрезы МТФ-14 и значение силы Q_x оказывается значительно меньше) значений, найденных с использованием алгоритмического метода. Это означает, что координатный угол φ_a , характеризующий положение точки приложения равнодействующей в традиционных методах расчета, имеет завышенное значение. Причина завышения угла φ_a опять-таки в том, что в традиционных методах расчет ведется по средней толщине стружки. Погрешности традиционного метода не являются незначимыми. Поэтому целесообразно использовать традиционный метод только при выполнении предварительных прикидочных расчетов при проектировании фрез торфяных машин, а уточненные расчеты выполнять алгоритмическим методом – с использованием компьютера и названного выше программного обеспечения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Копенкина Л.В., Копенкин В.Д. Торфяные машины как класс горных машин // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2002. № 5. С. 45–48.
2. Мороз Д.Р. Совершенствование технологических схем применения машин послойного фрезерования при ведении открытых горных работ // *Проблемы недропользования*. 2018. № 2. С. 75–81. DOI: 10.25635/2313-1586.2018.02.075.
3. Алиев С.Б., Сулеев Б.Д. Исследование и расчет дискового фрезерного рабочего органа // *Уголь*. 2018. № 11. С. 32–34. DOI: 10.18796/0041-5790-2018-11-32-34.
4. Шелгунов Ю.В., Кутуков Г.М., Лебедев Н.И. Технология и оборудование лесопромышленных предприятий: учебник. М.: МГУЛ. 2003. 589 с.

5. Солопов С.Г., Мурашов М.В., Миркин М.А. и др. Торфяные машины: учебник. М.: Высшая школа. 1962. 354 с.
6. Грановский Г.И., Грановский В.Г. Резание металлов: учебник для машиностроительных и приборостроительных специальностей вузов. М.: Высшая школа. 1985. 304 с.
7. Опейко Ф.А. Торфяные машины: учебник. Минск: Высшая школа. 1960. 228 с.
8. Синицын В.Ф. Алгоритм вычисления текущей толщины стружки, срезаемой ножом фрезы // *Технология и комплексная механизация торфяного производства. Межвузовский сборник научных трудов*. Тверь: ТГТУ. 1996. С. 68–76.
9. Синицын В.Ф. Алгоритм вычисления текущих сопротивлений, действующих на фрезу // *Изготовление, восстановление и упрочнение металлорежущего инструмента. Сборник научных трудов*. Тверь: ТГТУ. 1997. С. 69–75.
10. Синицын В.Ф. К методике экспериментального определения удельного расхода энергии на фрезерование грунта // *Известия вузов. Горный журнал*. 1977. № 2. С. 106.
11. Синицын В.Ф., Стрельников А.В. Программное обеспечение решения задачи размещения ножей на фрезе // *Вестник Томского государственного педагогического университета*. 2009. № 3 (81). С. 151–153.
12. Самсонов Л.Н., Синицын В.Ф. Торфяные машины и комплексы. Ч. II. Эскавация торфа из залежи: учебник для вузов. Тверь: ТГТУ. 1999. 188 с.

TWO METHODS FOR POWER AND ENERGY CALCULATION OF CYLINDRICAL MILLING CUTTER

V.F. SINIZIN, Dr Sci, L.V. KOPENKINA, Cand Sci

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

The article deals with two methods of solving the problem of power and energy calculation of cylindrical milling cutter peat machines as a class of mining machines – traditional and algorithmic. The traditional method of calculation does not reflect the pulsation of forces in the milling cutter process, does not allow to quantitatively the difference in the pulsation of resistance and power for milling cutters with different knife positions on the surface of the cutter, and cannot be used in the search and justification of the optimal position of knives. The proposed algorithmic method of calculation allows us to obtain patterns of changes in the resistance acting on a single cutter knife during chip cutting, as well as on the cutting plane and the cutter as a whole. It is advisable to use the traditional method only when performing preliminary calculations in the design of milling machines, and refined calculations to perform algorithmic method – using a computer and developed software.

Keywords: milling peat deposits, milling machine, knife of milling cutter, power of milling cutter, the cutting resistance, the chip thickness, the specific energy consumption for cutting.

REFERENCES

1. Kopenkina L.V., Kopenkin V.D. Peat machines as a class of mining machines // *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten*. 2002. № 5, pp. 45–48. (In Russian)

*ISSN 2687-0029. Вестник Тверского государственного технического университета.
Серия «Технические науки». № 2 (2), 2019*

2. Moroz D.R. Improvement of technological schemes for the use of layer-by-layer milling cutter machines in the conduct of open-pit mining // *Problemy nedropolzovaniya*. 2018. No 2, pp. 75–81. DOI: 10.25635 / 2313-1586.2018.02.075 (In Russian).
3. Aliev S.B., Suleev B.D. Research and calculation of the disk milling cutter working part // *Ugol'*. 2018. No 11, pp. 32–34. DOI: 10.18796/0041-5790-2018-11-32-34 (In Russian).
4. Shelgunov G.V., Kutukov G.M., Lebedev N.I. *Tekhnologiya i oborudovaniye lesopromyshlennykh predpriyatiy: uchebnik* [Technology and equipment of timber enterprises: textbook]. Moscow: MGUL. 2003. 589 p.
5. Solopov S.G., Murashov M.V., Mirkin M.A. *Torfyanyye mashiny: uchebnik* [Peat machines: textbook]. Moscow: Vysshaya shkola. 1962. 354 p.
6. Granovskii G.I., Granovskii V.G. *Rezaniye metallov: uchebnik dlya mashinostroitel'nykh i priborostroitel'nykh spetsial'nostey vuzov* [Cutting of metals: a Textbook for machine-building and instrument-making specialties]. Moscow: Vysshaya shkola. 1985. 304 p.
7. Opaca F.A. *Torfyanyye mashiny: uchebnik* [Peat machines: textbook]. Minsk: Vysshaya shkola. 1960. 228 p.
8. Sinitsyn V.F. Algorithm for calculation of the current thickness of shavings cut by the knife of milling cutter // *Technology and complex mechanization of peat production. Interuniversity collection of scientific works*. Tver: TSTU. 1996, pp. 68–76. (In Russian).
9. Sinitsyn V.F. Algorithm of calculation of the current resistance acting on the milling cutter // *Production, restoration and hardening of metal-cutting tools. Collection of proceedings*. Tver: TSTU. 1997, pp. 69–75. (In Russian).
10. Sinitsyn V.F. To the method of experimental determination of specific energy consumption for soil milling cutter. *Izvestiya vuzov. Gornyy zhurnal*. 1977. No 2. P. 106. (In Russian).
11. Sinitsyn V.F., Strelnikov A.V. Software solve the problem of placing the knives on the milling cutter // *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta*. 2009. No 3 (81), pp. 151–152. (In Russian).
12. Samsonov L.N., Sinitsyn V.F. *Torfyanyye mashiny i komplekсы. Chast. II. Ekskavatsiya torfa iz zalezhi: uchebnik dlya vuzov*. [Peat Machines and Complexes. Part II. Excavation of peat deposits: the textbook for high schools]. Tver: TSTU. 1999. 188 p.

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 004.89

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАССУЖДЕНИЙ АГЕНТА ПРИ ЖЕСТКИХ ВРЕМЕННЫХ ОГРАНИЧЕНИЯХ НА ОСНОВЕ РАСШИРЕННЫХ ШАГОВЫХ ТЕОРИЙ

И.Б. ФОМИНЫХ, д-р техн. наук, Н.П. АЛЕКСЕЕВ

Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
111250, Россия, г. Москва, ул. Красноказарменная, 14, e-mail: igborfomin@mail.ru

Рассматриваются формальные конструкции в системах жесткого реального времени, когда промедление с реакцией после определенного временного порога приводит к необратимому развитию событий. Для моделирования таких рассуждений предлагаются различные версии активной логики, которые дают возможность наблюдать за процессом рассуждения агента во время его осуществления.

Формулируются принципиальные отличия активной логики от традиционных немонотонных логик (отказ от логического всеведения, наличие свойств темпоральной чувствительности и самопознания). Рассматривается шаговая теория как одна из логических систем, отвечающих принципам активной логики, объединяющая их с принципами логического программирования и обладающая рядом преимуществ, в том числе лучшими характеристиками вычислительной сложности, свойством паранепротиворечивости; реализацией принципа грануляции времени. Для дальнейшего улучшения управления процессом рассуждений используются формализмы расширенных шаговых теорий, отличающиеся от стандартных шаговых теорий введением наряду с сильным отрицанием субъективного отрицания, что позволяет агенту осознавать и выражать в явном виде не только то, что он знает, но и то, чего он не знает в данный момент. На основе формализмов обоснованы возможности когнитивного агента оценивать имеющийся у него временной ресурс, контролировать моменты времени получения промежуточных результатов и корректировать процесс рассуждения по мере необходимости, меняя его стратегию.

Ключевые слова: жесткие временные ограничения, активная логика, расширенная шаговая логика, вычислительная сложность, субъективное отрицание, паранепротиворечивость, грануляция времени, временной ресурс.

ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия одним из наиболее значимых направлений искусственного интеллекта как в теоретическом, так и прикладном аспектах, стало исследование и проектирование динамических систем реального времени. Специалисты выделяют в основном два класса таких систем: интеллектуальные системы мягкого и жесткого реального времени.

Для систем мягкого реального времени [1] характерно постепенное ухудшение функционирования, когда запаздыванием с реакцией на изменения во внешней среде можно пренебречь. В системах жесткого реального времени такая идеализация, как

правило, неприемлема, ибо в этом случае промедление с реакцией после определенного временного порога может приводить к необратимому развитию событий. Для таких систем адекватно понятие временного порога, превышение которого недопустимо. Интеллектуальная система жесткого реального времени – это не только и даже не столько «быстрая» система, но главным образом это система, знающая о временных порогах и способная планировать свою работу в соответствии с ними.

Специфика интеллектуальных систем жесткого реального времени состоит в том, что дефицит времени в таких системах является основным фактором, обуславливающим неполноту используемых знаний и данных. В этих условиях оказывается неприемлемым одно из фундаментальных свойств, принятых в существующих темпоральных немонотонных логических системах, состоящее в том, что время, необходимое для проведения рассуждений, не учитывается.

АКТИВНАЯ ЛОГИКА

Для моделирования рассуждений в жестком реальном времени были предложены различные версии активной логики [2–5], которые дают возможность наблюдать за процессом рассуждения агента *во время* его осуществления.

Создатели активной логики подчеркивают ее принципиальное отличие от традиционных немонотонных систем, таких, например, как логика умолчаний, автоэпистемическая логика и т. д. На сегодня известны десятки различных темпоральных логик, назначение которых состоит в формализации *рассуждений о времени* (reasoning about time). Процесс рассуждения при этом происходит как бы вне времени: мир как бы останавливается, пока система «думает».

Для систем жесткого реального времени при решении задач важно уметь оценивать количество времени, имеющегося в их распоряжении «на размышления» до того момента, когда думать уже будет поздно. Для этого необходимо уметь соотносить по времени шаги и результаты проводимых рассуждений с событиями, происходящими во внешней среде. Рассуждения такого типа получили название *рассуждений во времени* (reasoning situated in time).

Общая концепция активной логики изложена в работе [2]. Как модель дедукции, активная логика характеризуется языком, множеством дедуктивных правил, а также множеством «наблюдений». Рассуждение во времени характеризуется выполнением циклов дедукции, называемых *шагами*. Так как в основе активной логики лежит дискретная модель времени, то эти шаги играют роль временного эталона (время измеряется в шагах). Знания агента ассоциируются с индексом шага, на котором они были впервые получены. Принципиальное отличие активной логики от других темпоральных эпистемических логик состоит в том, что темпоральные аргументы введены в язык собственных теорий агентов. Основными принципами активной логики являются отказ от логического всеведения, темпоральная чувствительность, самопознание.

Отказ от логического всеведения означает, что процесс рассуждений требует времени, он не происходит «одномоментно».

Пусть L – любая нормальная модальная логика, содержащая K , где K есть модальная эпистемическая логика, имеющая следующие аксиомы и правила вывода:

(PC) – все пропозициональные тавтологии;

(K) $K \alpha \wedge K(\alpha \rightarrow \beta) \rightarrow K \beta$;

(MP) *modus ponens*: из α и $(\alpha \rightarrow \beta)$ выводится β ;

(NEC) из α выводится $K \alpha$,

где K – модальный оператор знания.

Пусть \mathfrak{L} – язык модальной эпистемической логики, $\Gamma \subseteq \mathfrak{L}$.

Тогда, если $\Gamma \vdash_L \alpha$, то $K(\Gamma) \vdash_L K\alpha$, где $K(\Gamma) =_{\text{def}} \{ K\gamma : \gamma \in \Gamma \}$.

То есть если агент знает все формулы из множества Γ , а α логически следует из Γ , то агент знает α . Например, если агент знает все аксиомы теории чисел, то он знает и все ее теоремы, включая и те, которые пока математическому сообществу не известны.

Свойство темпоральной чувствительности определяет зависимость результатов рассуждений от количества времени, которое было потрачено для их получения. Оно означает, что результаты рассуждений, как конечные, так и промежуточные, могут быть соотнесены с моментами времени и рассуждающий агент способен осознавать и использовать это при управлении процессом своих рассуждений.

Самопознание означает осознание когнитивным агентом как тех формул, которые он знает в данный момент времени, так и формул, которых он *не знает*, а также осознание им того временного ресурса, которым он располагает в каждый момент времени.

Процесс рассуждений в данной системе активной логики может быть представлен как последовательность шагов (далее шагов вывода), на каждом из которых формируется так называемое множество мнений (belief set), представляющее собой множество формул на языке, близком к языку логики первого порядка, представленное эксплицитно. Каждому шагу вывода соответствует номер, который трактуется как момент времени на линейных дискретных часах. Этот номер вводится при помощи специального литерала, имеющего вид $\text{now}(i)$, где i – номер шага вывода. На этот номер могут делаться ссылки в формулах, что позволяет соотносить во времени шаги вывода с другими событиями, происходящими в системе и вокруг нее. Это и есть реализация свойств в темпоральной чувствительности. В любой известной версии активной логики шаг вывода представляет собой применение всех выполнимых на данный момент правил вывода. Это полностью определяется текущим множеством мнений.

Состав и структура правил вывода отличается в различных версиях активной логики, но немонотонный характер проводимых рассуждений всегда определяется использованием двух принципов: 1) обнаружения и исправления противоречий; 2) негативной интроспекции. Первый принцип состоит в выявлении и по возможности устранении в текущем множестве мнений так называемых прямых противоречий, то есть литералов, образующих контрарную пару (например, q и $\neg q$). Второй принцип состоит в использовании проблемно-зависимых правдоподобных правил вывода, позволяющих делать заключения на основе утверждений, интерпретируемых как «на момент выполнения данного шага вывода неизвестно, что φ » (где φ некоторая формула, обычно литерал).

ШАГОВЫЕ ТЕОРИИ АКТИВНОЙ ЛОГИКИ

Одно из направлений в системах активной логики, введенное в [6], образуют различные системы шаговых теорий. Семантика этих систем описывается в терминах множеств литералов, а не более сложных структур в стиле Крипке, чем достигаются лучшие характеристики вычислительной сложности по сравнению с другими системами активной логики и что определяет их сходство с системами логического программирования в «обычной» логике. Кроме того, шаговые теории обладают свойством паранепротиворечивости и в них реализован принцип грануляции времени, трактуемого как внешняя сущность, не зависящая от внутренней структуры логической программы.

Как известно, противоречивая теория – это логическая теория, в которой одновременно доказуемо некоторое предложение и его отрицание. Под тривиальной теорией понимается противоречивая логическая теория, в которой доказуемо любое ее предложение. Или формально: для любых формул A и B имеет место $\{A, \neg A\} \vdash B$. Логика называется паранепротиворечивой, если она может быть положена в основу противоречивых, но не тривиальных теорий, то есть противоречивая информация не должна приводить к разрушению всей системы рассуждений, как это имеет место в большинстве логических систем. Рассуждения, обладающие толерантностью к противоречиям, носят название паранепротиворечивых. В настоящее время теоретическую проработку вопросов, связанных с толерантностью к противоречиям (паранепротиворечивостью), применительно к системам активной логики нельзя назвать достаточной [5]. В то же время для шаговых теорий такое доказательство паранепротиворечивости было получено и представлено в работе [7].

Шаговая теория представляет собой множество правил, иногда с заданным на нем бинарным отношением предпочтения. Множество правил может быть разбито на два подмножества – строгих и правдоподобных правил. В дальнейшем, не жертвуя общностью, ограничимся только случаями, когда отношение предпочтения пусто, а в теории присутствуют только правдоподобные правила вида

$$N: a_1 \wedge a_2 \dots \wedge a_m \Rightarrow b, \quad (1)$$

где N – строка символов, обозначающая имя правила, b – пропозициональный литерал, $a_1 \dots a_m$ – пропозициональные литералы или литералы языка логики первого порядка вида $\text{later}(j)$ или $\neg \text{later}(j)$, где j – натуральное число.

Шаговой теорией назовем пару $T = (R, Ck)$, где R – конечное множество правил вида (1), Ck – часы шаговой теории, представляющие собой конечную подпоследовательность последовательности натуральных чисел. Члены данной подпоследовательности характеризуют длительность последовательно выполняемых дедуктивных циклов, определяющих процесс рассуждения во всех системах активной логики. Не теряя общности результатов, будем полагать $Ck = (0, 1, 2, 3, 4, \dots)$.

Для любой шаговой теории $T = (R, Ck)$ будем обозначать $R[q]$ множество всех правил, консеквентом которых является q . Множество литералов, образующих антецедент правила r , обозначается $A(r)$. Пусть Lit_T – множество всех литералов, встречающихся в правилах шаговой теории T . *Множеством убеждений* шаговой теории $T = (R, Ck)$ называется множество вида $\{\text{pow}(t)\} \cup L_T^t$, где t – натуральное число или 0, момент времени на часах Ck данной шаговой теории, $L_T^t \subset Lit_T$. Рассмотрим оператор \mathfrak{A}_T , преобразующий множества убеждений во множества убеждений таким образом, что если B – множество убеждений, такое, что $\text{pow}(t) \in B$, то $\text{pow}(t+1) \in \mathfrak{A}_T(B)$. Пусть B – множество убеждений теории T , такое, что литерал $\text{pow}(t) \in B$. *Историей* в шаговой теории T называют конечную последовательность B множеств убеждений. При этом $B(i)$ обозначает i -й член в истории, $B(0) = \{\text{pow}(0)\}$, для любого t $B(t+1) = \mathfrak{A}_T(B(t))$. Последним элементом истории является множество убеждений, обозначаемое B_{fin} , (*финальное*). *Шагом вывода* шаговой теории $T = (R, Ck)$ называют всякую пару вида $(B(i), B(i+1))$, при этом *номером шага вывода* называют число, равное $(i+1)$. *Следствием* (t -*следствием*) шаговой теории T называют литерал, принадлежащий множеству убеждений B_{fin} ($B(t), t \in Ck$).

РАСШИРЕННЫЕ ШАГОВЫЕ ТЕОРИИ АКТИВНОЙ ЛОГИКИ

Расширенная шаговая теория [8] есть пара $T = \langle R, Ck \rangle$, где R – конечное множество правил, Ck – часы шаговой теории, например $Ck = (0, 1, 2, 4, 7, 11)$.

Правила имеют вид

$$N: a_1 \wedge a_2 \dots \wedge a_m \wedge \text{not}^t c_1 \wedge \text{not}^t c_2 \dots \wedge \text{not}^t c_n \Rightarrow b, \quad (2)$$

где N – строка символов, обозначающая имя правила; b – пропозициональный литерал; a_1, \dots, a_m – пропозициональные литералы или литералы языка логики первого порядка вида $\text{later}(j)$ или $\neg \text{later}(j)$, где j – натуральное число; c_1, c_2, \dots, c_n – пропозициональные литералы; not^t – оператор субъективного отрицания [9], введенный по аналогии с формализмами расширенных логических программ [10, 11].

Выражение вида « $\text{not}^t c$ », где c – пропозициональный литерал, трактуется как «литерал c не был выведен к текущему моменту времени». Отметим, что введение субъективного отрицания имеет непосредственное отношение к реализации принципа самопознания, позволяющего агенту осознавать и выражать в явном виде не только то, что он знает, но и то, чего он не знает в данный момент, что улучшает выразительные возможности теории (и в частности, свойство темпоральной чувствительности расширенных шаговых теорий).

В дальнейшем всякий пропозициональный литерал вида a_i , перед которым не стоит оператор субъективного отрицания not^t , будем называть объективным литералом. Всякий литерал вида $\text{not}^t c_j$ будем называть субъективным литералом.

УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ РАССУЖДЕНИЯ ПРИ ЖЕСТКИХ ВРЕМЕННЫХ ОГРАНИЧЕНИЯХ

Поскольку процесс рассуждения в режиме жестко ограниченного ресурса времени (ЖРВ) имеет строгие временные рамки, выход за которые неприемлем, агент должен контролировать этот процесс, стремясь при этом вовремя выявлять ситуации, когда возникают непредвиденные осложнения (аномалии). Таким образом, при управлении процессом решения задачи когнитивный агент должен располагать следующими взаимосвязанными возможностями:

1. Оценивать имеющийся у него временной ресурс.
2. Контролировать моменты времени получения промежуточных результатов.
3. Корректировать процесс рассуждения, по мере необходимости меняя его стратегию.

ОЦЕНКА ИМЕЮЩЕГОСЯ ВРЕМЕННОГО РЕСУРСА

Для агентов, имеющих жестко ограниченный ресурс времени, контроль этого ресурса невозможно осуществить, не соотнося результаты, полученные в ходе процесса рассуждения, с моментами времени, когда эти результаты были получены. В соответствии с расширенной шаговой теорией в каждом множестве убеждений теории содержится ровно один литерал вида $\text{now}(t)$, где t – момент времени на часах Ck , указывающий на то, когда было сформировано данное множество убеждений (момент времени завершения очередного дедуктивного цикла).

Этой информации достаточно для того, чтобы контролировать убывание временного ресурса по мере развития познавательного процесса. Так, использование литерала вида $\text{later}(t)$ позволяет оценивать текущий временной ресурс сверху, тогда как литерал вида $\neg \text{later}(t)$ позволяет оценить нижнюю границу текущего временного ресурса.

Пример 1. Рассмотрим теорию $T_1 = (R_1, Ck_1)$, где $R_1 = \{ N1: \Rightarrow a, N2: a \Rightarrow b, N3: b \Rightarrow c, N4: \neg \text{later}(7) \wedge c \Rightarrow \text{set_a_subgoal_A}, N5: \text{later}(7) \wedge \text{not}^t \text{set_a_subgoal_A} \Rightarrow \text{set_a_subgoal_B} \}$, $Ck_1 = (1, 3, 8, 10, \dots)$. История данной теории T_1 выглядит как $B(0) = \{\text{now}(0)\}$, $B(1) = \{\text{now}(1), a\}$, $B(2) = \{\text{now}(3), a, b\}$, $B(3) = \{\text{now}(8), a, b, c\}$, $B(4) = B_{\text{fin}} = \{\text{now}(10), a, b, c, \text{set_a_subgoal_B}\}$. На содержательном уровне процесс вывода можно прокомментировать следующим образом. В ходе познавательного процесса, формализованного с помощью теории T_1 , на шаге $B(3)$ была проведена оценка временного ресурса на предмет возможности установления локальной подцели A с помощью правила $N4$. Ресурс оказался недостаточным, и была установлена локальная подцель B . Заметим, что если рассматривать теорию $T_2 = (R_1, Ck_{12})$, отличающуюся от T_1 только часами $Ck_{12} = (1, 3, 6, 8, \dots)$, то $B(4) = B_{\text{fin}} = \{\text{now}(8), a, b, c, \text{set_a_subgoal_A}\}$. Здесь шаг 3 имеет меньшую продолжительность, чем в предыдущем случае, и имеющегося временного ресурса на момент завершения шага 3 хватило для того, чтобы установить подцель A .

КОНТРОЛЬ ПРОМЕЖУТОЧНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

В условиях жестких временных ограничений чрезвычайно важно контролировать ход процесса рассуждений, выявляя возникающие аномалии. В условиях жесткого реального времени проявление аномалий в первую очередь связано с задержкой получения ожидаемых результатов. Для этого необходимо, чтобы агент был способен *осознавать* не только то, что он знает в данный момент времени, но и то, чего он к этому моменту *не знает*. В формализме расширенных шаговых теорий активной логики такая способность (самопознание) реализуется благодаря использованию оператора субъективного отрицания not^t . Заметим, что в других существующих формализмах шаговых теорий, где оператор субъективного отрицания отсутствует, также отсутствует и способность к самопознанию.

Пример 2. Рассмотрим теорию $T_3 = (R_3, Ck_3)$, где $R_3 = \{ N1: \Rightarrow a, N2: a \Rightarrow b, N3: b \Rightarrow c, N4: \text{later}(6) \wedge \text{not}^t c \Rightarrow \text{anomaly} \}$, $Ck_3 = (1, 7, 9, \dots)$. История теории T_3 выглядит как $B(0) = \{\text{now}(0)\}$, $B(1) = \{\text{now}(1), a\}$, $B(2) = \{\text{now}(7), a, b\}$, $B(3) = B_{\text{fin}} = \{\text{now}(9), a, b, c, \text{anomaly}\}$. В данном случае на шаге 2, когда контрольный временной рубеж был достигнут, но литерал c вопреки ожиданиям не появился во множестве убеждений $B(2)$, сработало правило $N4$, зафиксировавшее наличие аномалии.

КОРРЕКЦИЯ ПОЗНАВАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА

Основные задачи анализа выявленных аномалий в условиях жестких временных ограничений состоят в оценке степени угрозы пересечения дедлайна (временного порога), связанного с выявленной аномалией, а также размеров имеющегося временного ресурса, который может быть использован для того, чтобы этой угрозы избежать. Представляется, что в таких случаях должны быть предусмотрены специальные «аварийные» стратегии, когда качество решения приносится в жертву скорости его нахождения. Ниже рассмотрен пример, когда при выявлении аномалии активизируются правила, специально предусмотренные для такого случая. Разумеется, на практике возможны ситуации, связанные с аномалиями различных типов и тогда для каждого такого типа, предусматриваются свои правила, но это не меняет сути того, что рассмотрено в данном примере.

Пример 3. Рассмотрим теорию $T_3 = (R_3, Ck_3)$, где $R_3 = \{ N1: \Rightarrow a, N2: \text{not}^t \text{anomaly} \wedge a \Rightarrow b, N3: \text{not}^t \text{anomaly} \wedge b \Rightarrow c, N4: \text{not}^t \text{anomaly} \wedge c \Rightarrow d, N5: \text{later}(6) \wedge \text{not}^t c \Rightarrow \text{anomaly}, N6: \text{anomaly} \wedge a \Rightarrow e, N7: \text{anomaly} \wedge e \Rightarrow f \}$, $Ck_3 = (1, 7, 9, 11, 13, \dots)$. История теории T_3 будет такой: $B(0) = \{\text{now}(0)\}$, $B(1) = \{\text{now}(1), a\}$, $B(2) = \{\text{now}(7), a, b\}$,

$B(3) = \{\text{now (9), } a, \text{ anomaly}\}$, $B(4) = \{\text{now (11), } a, \text{ anomaly, } e\}$, $B(5) = B_{\text{fin}} = \{\text{now (13), } a, \text{ anomaly, } f\}$. В данном случае правило $N5$ на шаге 3 из-за отсутствия выведенного к этому времени литерала c вывело объективный литерал anomaly , после чего познавательный процесс перешел под «кризисное управление»: теперь стали применимы только правила, имеющие в antecedенте литерал anomaly , в то время как правила, имеющие в antecedенте субъективный литерал $\text{not}^t \text{anomaly}$, стали не применимы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Рассмотрены формальные конструкции в системах жесткого реального времени, когда промедление с реакцией после определенного временного порога приводит к необратимому развитию событий: формализму активной логики, шаговой теории и расширенной шаговой теории.

2. Сформулированы принципиальные отличия активной логики от традиционных немонотонных логик, таких как логика умолчаний, автоэпистемическая логика и т. д. (отказ от логического всеведения, наличие свойств темпоральной чувствительности и самопознания). Отказ от логического всеведения означает, что процесс рассуждений требует времени, он не происходит «одномоментно». Свойство темпоральной чувствительности означает, что результаты рассуждений, как конечные, так и промежуточные, могут быть соотнесены с моментами времени и рассуждающий агент способен осознавать и использовать это при управлении процессом своих рассуждений.

Самопознание связано с осознанием когнитивным агентом как тех формул, которые он знает в данный момент времени, так и формул, которых он не знает, а также осознание имеющегося временного ресурса.

3. Сформулированы преимущества шаговой теории по сравнению с другими системами активной логики (улучшенные характеристики вычислительной сложности, паранепротиворечивость, реализация принципа грануляции времени). Паранепротиворечивость шаговой логики позволяет избежать разрушения всей системы рассуждений, несмотря на присутствие противоречивой информации.

4. Для дальнейшего улучшения управления процессом рассуждений используются формализмы расширенных шаговых теорий, отличающиеся от стандартных шаговых теорий введением наряду с сильным отрицанием субъективного отрицания, что позволяет когнитивному агенту осознавать и выражать в явном виде не только то, что он знает, но и то, чего он не знает в данный момент. Это улучшает выразительные возможности теории, и в частности, свойство темпоральной чувствительности.

5. На основе формализмов обоснованы возможности когнитивного агента оценивать имеющийся у него временной ресурс, контролировать моменты времени получения промежуточных и конечных результатов и корректировать процесс рассуждения по мере необходимости, меняя его стратегию.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты №17-07-00696, 18-07-00213, 18-29-03088, 18-51-0007, 19-07-00123).

ЛИТЕРАТУРА

1. Виньков М.М., Фоминых И.Б. Формализация рассуждений с умолчаниями в интеллектуальных системах реального времени на основе временной логики. *Сборник трудов 7-й Национальной конференции по искусственному интеллекту «КИИ-2000»*. Т. 1. М.: Изд-во физ.-мат. литературы. 2000.
2. Elgot-Drapkin J. Step Logic: Reasoning situated in time. PhD thesis. Department of computer science, University of Maryland, Colledge-Park, Maryland. 1988.
3. Purang K., Purushothaman D., Traum D., Andersen C., Perlis D. Practical Reasoning and Plan Executing with Active Logic. *Proceedings of the IJCAI'99 Workshop on Practical Reasoning and Rationality*. 1999. P. 30–38.
4. Perlis D., Purang K., Purushothaman D., Andersen C., Traum D. Modeling time and metareasoning in dialog via active logic. *Working Notes of AAAI Fall Symposium on Psychological Models of Communication*. 1999. P. 93–99.
5. Hovold J. On a semantics for active logic. MA Thesis, Department of Computer Science, Lund University. 2011.
6. Виньков М.М. Активная логика с точки зрения фундированной семантики логических программ с приоритетами. *Труды конференции КИИ'2004*. Т. 1. М.: Физматлит. 2004. С. 86–94.
7. Виньков М.М., Фоминых И.Б. Аргументационная семантика для шаговых теорий активной логики с грануляцией времени. *Искусственный интеллект и принятие решений*. М.: УРСС. № 3. 2015. С. 95–101.
8. Vinkov M.M., Fominykh I.B. Extended Stepping Theories of Active Logic: Paraconsistent Semantics. *Proceedings of the 16th Russian Conference RCAI 2018 Moscow, Russia, September 24–27, 2018*. Communications in Computer and Information Science. V. 934. Springer. P. 70–78.
9. Vinkov M.M., Fominykh I.B. Stepping Theories of Active Logic with Two Kinds of Negation. *Advances in electrical and electronic engineering*. 2017. V. 15. № 1. P. 84–92.
10. Dung P.M. Negation as hypothesis: an abduction foundation for logic programming. *Proceedings of the 8th International on Logic Programming*. Paris, France. MIT Press. 1991.
11. Gelfond M., Lifschitz V. Classical Negation in Logic Programs and Disjunctive Databases. *New Generation Computing* 1991. № 9. P. 365–385.

MODELING AGENT'S DISCUSSIONS UNDER HARD TIME LIMITATIONS ON THE BASIS OF EXTENDED STEP THEORIES

I.B. FOMINYKH, Dr Sci, N.P. ALEKSEEV

National Research University «MEI», 14, Krasnokazarmennaya st.,
Moscow, 111250, Russia, e-mail: igborfomin@mail.ru

Formal constructions in hard real-time systems are considered, when a delay in reaction after a certain time threshold leads to irreversible development of events. To simulate such reasoning, various versions of active logic are proposed, which make it possible to observe the process of reasoning the agent during its implementation.

The fundamental differences between active logic and traditional non-monotonic logics are formulated (rejection of logical omniscience, the presence of temporal sensitivity properties and self-knowledge). Step theory is considered as one of the logical systems that

meet the principles of active logic, combining them with the principles of logic programming and has several advantages, including the best characteristics of computational complexity, the paraconsistency property; implementation of the principle of granulation of time. To further improve the management of the reasoning process, the formalisms of extended step theories are used, which differ from standard step theories by introducing, along with a strong negation of subjective negation, which allows the agent to realize and express not only what he knows, but also what he does not at the moment. On the basis of the formalisms, the cognitive agent's possibilities are justified to evaluate the time resource available to him, control the time points for obtaining intermediate results, and adjust the reasoning process as necessary, changing his strategy.

Keywords: hard time constraints, active logic, extended step logic, computational complexity, subjective negation, paraconsistency, time granulation, time resource.

ACKNOWLEDGMENTS

This work was financially supported by the Russian Foundation for Basic Research, (projects №17-07-00696, 18-07-00213, 18-29-03088, 18-51-0007, 19-07-00123).

REFERENCES

1. Vinkov M.M., Fominykh I.B. Formalization of reasoning with defaults in real-time intelligent systems based on temporal logic *Proceedings of the 7th Russian Conference on Artificial Intelligence «RCAI-2000»*, Moscow, Fizmatlit Publ. V. 1, 2000 (In Russian).
2. Elgot-Drapkin J. Step Logic: Reasoning situated in time. PhD thesis. Department of computer science, University of Maryland, Colledge-Park, Maryland, 1988.
3. Purang K., Purushothaman D., Traum D., Andersen C., Perlis D. Practical Reasoning and Plan Executing with Active Logic. *Proceedings of the IJCAI'99 Workshop on Practical Reasoning and Rationality*. 1999, pp. 30–38.
4. Perlis D., Purang K., Purushothaman D., Andersen C., Traum D. Modeling time and metareasoning in dialog via active logic. *Working Notes of AAAI Fall Symposium on Psychological Models of Communication*. 1999, pp. 93–99.
5. Hovold J. On a semantics for active logic *MA Thesis, Department of Computer Science, Lund University*, 2011
6. Vinkov M.M. Active logic in the context of well-founded semantics of logical programs with priorities. *Proceedings of the 9th Russian Conference on Artificial Intelligence «RCAI-2004»*, Moscow, Fizmatlit Publ. 2004. V. 1, pp. 86–94 (In Russian.)
7. Vinkov M.M., Fominykh I.B. Argumentation semantics for step theories of active logic with time granulation *Iskustvenny intellekt i prinyatie resheny*, URSS, 2015. No 3, pp. 95–101. (In Russian)
8. Vinkov M.M., Fominykh I.B. Extended Stepping Theories of Active Logic: Paraconsistent Semantics. *Proceedings of the 16th Russian Conference RCAI 2018* Moscow, Russia, September 24–27, 2018. Communications in Computer and Information Science. V. 934. Springer, pp. 70–78.
9. Vinkov M.M., Fominykh I.B. Stepping Theories of Active Logic with Two Kinds of Negation *Advances in electrical and electronic engineering*. 2017. V. 15. No. 1, pp. 84–92.
10. Dung P.M. Negation as hypothesis: an abduction foundation for logic programming *Proceedings of the 8th International on Logic Programming*. Paris, France. MIT Press, 1991.
11. Gelfond M., Lifschitz V.: Classical Negation in Logic Programs and Disjunctive Databases *New Generation Computing* 1991. № 9, pp. 365–385.

САЕ-МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ФОРМООБРАЗУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ ШТАМПА ПРИ ХОЛОДНОЙ ОБЪЕМНОЙ ФОРМОВКЕ

Д.А. ЗОРЕНКО, канд. техн. наук

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

Представлены основные результаты САЕ-моделирования напряженного состояния пуансона и матрицы при операциях формования холодно-листовой штамповки. Для решения наших задач был выбран программный комплекс «Компас АРМ FEM» фирмы АСКОН. Этот программный продукт является отечественной разработкой, а следовательно, значительно более доступен в сравнении с иностранными системами. В статье описан процесс моделирования в программном продукте «Компас АРМ FEM». Представлены некоторые полученные результаты и выводы. Произведено качественное сравнение результатов САЕ-моделирования с результатами натурального эксперимента.

Ключевые слова: САЕ-системы, компьютерное моделирование, метод конечных элементов, постпроцессор, расчетная сетка, граничные условия, формообразующие элементы, пуансон, матрица, холодно-листовая штамповка.

ВВЕДЕНИЕ

Современная штамповая оснастка является сложным технологическим устройством, стабильность и функционирование которого напрямую зависят от надежности его элементов (и особенно формообразующих). Штампы различают по технологическому признаку, конструктивному оформлению, способу подачи заготовок и удалению отходов. По технологическому признаку штампы разделяют на две группы: штампы для разделительных операций и штампы для формоизменяющих операций. По конструктивному оформлению различают штампы без направляющих устройств, с направляющей плитой (пакетные штампы), с направляющими колонками (блочные штампы). По способу подачи заготовок штампы могут быть разделены на штампы с ручной подачей и автоматической, а по способу удаления отштампованных изделий – на штампы с провалом через окно в матрице, обратной запрессовкой детали в полосу, выталкиванием детали в верхнюю часть штампа и удалением ее жестким выталкиванием, сдуванием сжатым воздухом или удалением вручную [1].

Сегодня существует множество систем автоматизированного проектирования (САПР) изделий из листового материала и штамповой оснастки для их изготовления. Проектирование штампованных деталей из листового материала проводится в САД-системах (САД – Computer Aided Design), которые производят геометрическое моделирование самих деталей листовой штамповки, проектирование же штамповой оснастки происходит в САМ-системах (САМ – Computer Aided Manufacturing), которые предназначены для технологической подготовки производства. Расчет основных деталей, узлов, самих технологических процессов (ТП) с целью проверки проектных решений проводится в САЕ-системах (САЕ – Computer Aided Engineering). Благодаря этому в использовании САД/САМ/САЕ-систем популярность приобрела так называемая пирамидальная схема, которая предусматривает организацию небольшого количества рабочих мест, оснащенных системами высокого уровня, способными

производить концептуальную конструкторско-технологическую проработку нового изделия [2, 3]. Для подготовки конструкторско-технологической документации и рабочих чертежей предполагается организация рабочих мест, которые оснащены системами легкого уровня. В зависимости от размера предприятия количество таких мест может доходить до тысячи и более. Такой подход позволяет существенно экономить ресурсы за счет использования на рабочих местах программных средств только с необходимым набором функциональных возможностей [4, 5].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

На сегодняшний день существует множество САЕ-систем, позволяющих осуществлять моделирование работы формообразующих элементов технологической оснастки. В настоящей работе для решения поставленных задач использовали программный комплекс «Компас АРМ FEM» фирмы АСКОН. По сравнению с иностранными системами этот программный продукт более доступен, так как является отечественной разработкой [6].

Сущность виртуального исследования заключалась в замере ряда параметров формообразующих элементов в процессе объемного формования листового металла при различных условиях с фиксированным значением технологического усилия на уровне 200 кН. Количество экспериментов определялось числом различных комбинаций материалов инструмента (У8А, Х12М, ХВГ) и заготовки (Ст3, 08КП), являющихся наиболее распространенными при холодно-листовой штамповке. В каждом эксперименте участвовало три штампа различной геометрической формы: штамп для вытяжки круглой формы, штамп для вытяжки квадратной формы, штамп для гибки. При этом в исследовании каждой модели штампа производились замеры параметров инструмента при работе с заготовками трех различных толщин: 1 мм, 3 мм, 8 мм, также являющихся наиболее распространенными. В процессе исследования фиксировались следующие величины: напряжения, возникающие в пуансоне; величина деформации; коэффициент запаса по пределу прочности; коэффициент запаса по усталостной прочности; количество циклов работы оснастки. В качестве виртуальной, расчетной модели были созданы 3D-сборки, состоящие из трех компонентов: матрицы, пуансона, заготовки. Материалы компонентов в каждом эксперименте задавались из справочника системы АРМ FEM. Далее формировалась треугольная расчетная сетка. С целью более достоверного моделирования процесса контакт между пуансоном, листом и матрицей в тангенциальном направлении задавался скользящим. После проведения расчета производилась визуализация полученных результатов (рис. 1 и 2).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Визуализация расчета представляет собой цветовую заливку поверхности детали. В качестве результатов виртуального эксперимента были проанализированы следующие: напряжения, перемещения, нагрузки, коэффициент запаса прочности, главные напряжения, усталостные характеристики, деформации. На рис. 3 представлена визуализация, показывающая перемещение квадратного пуансона при технологической операции вытяжки листовой стали толщиной 1 мм в квадратную матрицу.

Моделирование процесса формования квадратной детали позволило оценить механические напряжения не только в ребре рабочей кромки, но и в ее вершинах. Во всех шести экспериментах наблюдалась линейная зависимость величины механических напряжений от толщины заготовки, с увеличением толщины заготовки значение величины максимальной деформации в инструменте также увеличивается. При этом характер зависимости таков, что при переходе от заготовки толщиной 1 мм к заготовке

толщиной 3 мм увеличение значений напряжения и деформации рассматриваемого параметра резкое, а при переходе от заготовки толщиной 3 мм к заготовке толщиной 8 мм рост более плавный.

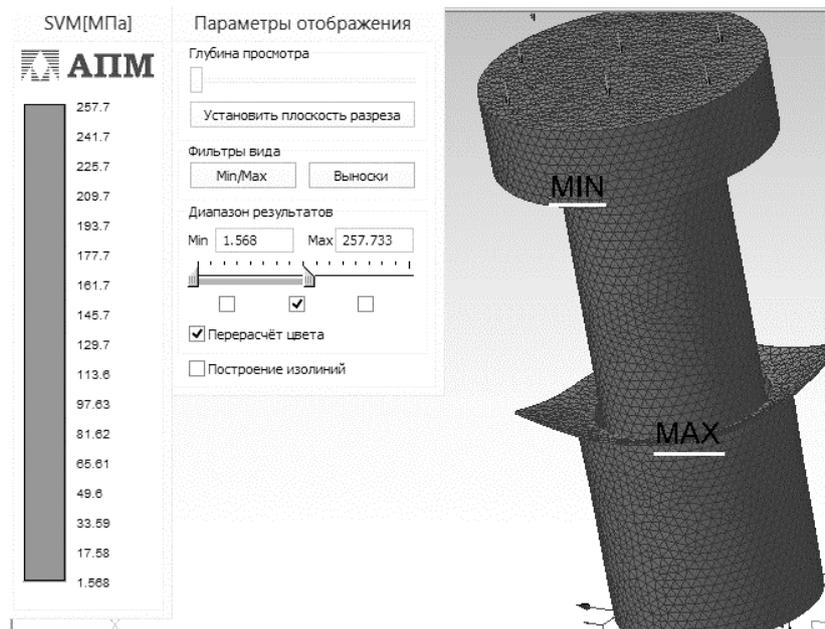


Рис. 1. Пример визуализации результатов при моделировании операции вытяжки

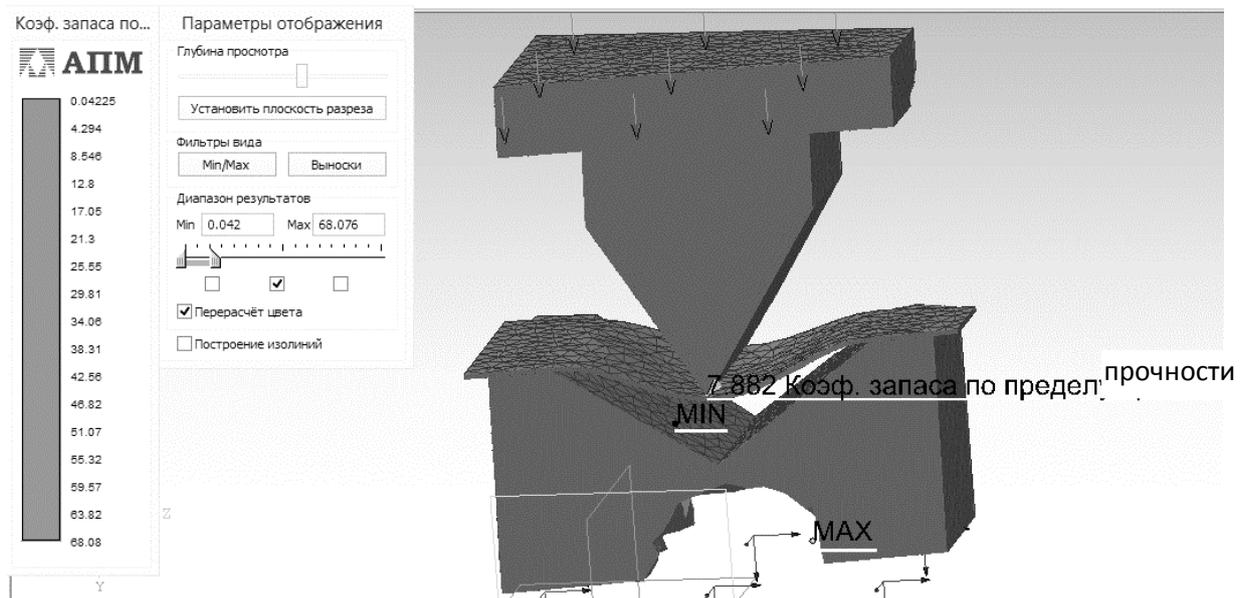


Рис. 2. Пример визуализации результатов при моделировании операции гибки

С точки зрения наименьших значений максимальных деформаций инструмента наиболее удачным оказалось сочетание материалов формообразующей части штампа и заготовки в эксперименте (X12M; Ст3), значения величины исследуемого параметра в котором минимальны при вытяжке заготовок всех толщин. Наибольшие же значения максимальных деформаций инструмента наблюдаются в эксперименте с парой материалов (X12M; 08КП). При сравнении результатов, полученных при работе пуансона для гибки с результатами исследований вариантов вытяжки, можно заметить,

что в данном случае область значений показателей в несколько раз шире, а значения величин исследуемых параметров в несколько раз большие, чем в предыдущих.



Рис. 3. Перемещение пуансона при вытяжке заготовки толщиной 1 мм в квадратную матрицу

С целью верификации данных, получаемых посредством программного комплекса «Компас АРМ FEM», был проведен натурный эксперимент с заданными условиями, после чего была смоделирована работа пуансона при таких же начальных граничных условиях, результаты представлены на рис. 4.

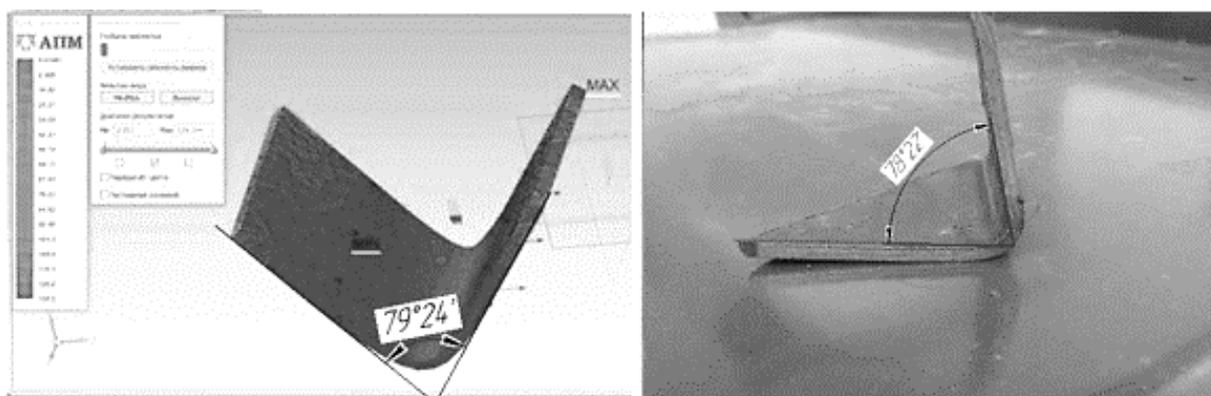


Рис. 4. Результаты виртуального и натурального экспериментов

В качестве доступного оборудования для реализации эксперимента был использован пневмогидравлический пресс П-60 с оснасткой для гибки, состоящей из матрицы с углом формующей части 60 градусов и пуансона с углом 40 градусов. В качестве заготовки использовался лист, материал – углеродистая сталь марки Ст3 толщиной 3 мм. Технологическое усилие 1,5 т. В качестве сравниваемого параметра был выбран угол заготовки при остаточной деформации после снятия нагружения.

Степень расхождения данных виртуального и натурального экспериментов составила 2,62 %, что является весьма хорошим показателем точности расчетов, проводимых в программном комплексе КОМПАС-3D, в системе прочностного анализа АРМ FEM.

Исходя из анализа полученных результатов напряженного состояния пуансона и матрицы наиболее удачным вариантом повышения долговечности их работы является использование сменных рабочих поверхностей, изготавливаемых из инструментальных сплавов, в то время как основное тело можно изготавливать из углеродистых конструкционных сталей. При формовании многогранных деталей из стали марки Ст3 наиболее удачным является использование инструментальной стали У8А, а для деталей, имеющих плавные переходы контура, в соотношении «цена / число циклов» наиболее удачным является использование стали Х12М. Анализ зон напряжения формообразующих элементов штампа показал необходимость использования плавных переходов между рабочими поверхностями на пуансоне и матрице.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В качестве основных выводов можно отметить следующие: применение метода конечных элементов позволяет быстро, эффективно, а главное, достоверно оценить напряженное состояние штампового инструмента. Проведенные виртуальные и натурные эксперименты показали хорошую корреляцию; расчетный модуль АРМ FEM фирмы АСКОН позволяет успешно решать задачи, связанные с оценкой прочностных характеристик инструмента, применяемого при обработке металлов методами холодного деформирования. Подобные методики позволяют значительно упростить процесс анализа результатов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Схиртладзе А.Г. Автоматизированное проектирование штампов. Владимир: ВГУ. 2007. 284 с.
2. Почекуев Е.Н. Проектирование штампов для последовательной листовой штамповки в системе NX. М.: ДМК-Пресс. 2012. 336 с.
3. Демьяненко Е.Г. Анализ технологических процессов отбортовки-формовки в системе LS-DYNA. *Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королева*. 2016. Вып. 7. С. 41–45.
4. Лексутов И.С. Автоматизация совместного численного и экспериментального исследования технологических процессов. *Вестник Приамурского государственного университета им. Шолом-Алейхема*. 2013. Вып. 11. С. 56–60.
5. Звонов С.Ю. Экспериментальное исследование процессов вытяжки, вытяжки с отбортовкой и принудительным утонением толстостенной заготовки. *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2010. № 7. С. 558–561.
6. Чепижко П.В., Зоренко Д.А. САМ-системы для моделирования работы пуансона при формовании изделий из листовой стали. *Актуальные проблемы машиноведения, безопасности и экологии в природопользовании. Материалы IV Международной научно-практической конференции*. 2018. С. 171–175.

CAE-MODELLING OF TENSION OF FORM-BUILDING ELEMENTS OF THE STAMP AT COLD VOLUME MOLDING

D.A. ZORENKO, Cand Sci

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

The article presents the main results of CAE-modeling of the stress state of the punch and the matrix during cold-sheet forming operations. For the solution of these problems, was chosen the software complex Compass APM FEM of ASKON firm. This software product is a domestic development, and therefore much more accessible in comparison with foreign systems. The article describes the modeling process in the software product Compass APM FEM. Some results and conclusions are presented. A qualitative comparison of CAE-modeling results with the results of full-scale experiment was made.

Keywords: CAE-systems, computer simulation, finite element method, postprocessor, computational grid, boundary conditions, forming elements, punch, matrix, cold-sheet stamping.

REFERENCES

1. Skhirtladze A.G. Avtomatizirovannoye proyektirovaniye shtampov [The automated design of stamps]. Vladimir: VSU. 2007. 284 p. (In Russian).
2. Pohekuyev E.N. Proyektirovaniye shtampov dlya posledovatel'noy listovoy shtampovki v sisteme NX. [Design of stamps for consecutive sheet stamping in the NX system]. M.: DMK-Press. 2012. 336 p. (In Russian).
3. Demyanenko E.G. The analysis of technological processes of collaring molding in the LS-DYNA system. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta im. Akademika S.P. Koroleva*. 2016. V. 7, pp. 41–45. (In Russian).
4. Leksutov I.S. Automation of a joint numerical and pilot study of technological processes. *Vestnik Priamurskogo gosudarstvennogo universiteta im. Sholom-Aleykhema*. 2013. V. 11, pp. 56–60. (In Russian).
5. Zvonov S.Yu. A pilot study of processes of an extract, extract with collaring and compulsory thinning of thick-walled preparation. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk*. 2010. No 7, pp. 558–561. (In Russian).
6. Chepizhko P.V., Zorenko D.A. CAM-systems for modeling the work of the punch when forming products from sheet steel. *Aktual'nyye problemy mashinovedeniya, bezopasnosti i ekologii v prirodopol'zovanii Materialy IV Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*. 2018, pp. 171–175. (In Russian).

ОБНАРУЖЕНИЕ ОБЛАСТЕЙ С КОСМИЧЕСКИМ МУСОРОМ НА ИЗОБРАЖЕНИИ ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯМИ

И.И. ЗЫКОВ, канд. техн. наук

Тверской государственной технической университет,
170026, Тверь, наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: kemer0802@mail.ru

Рассмотрена проблема обнаружения космического мусора на изображениях, полученных оптико-электронной системой космического аппарата в сложных фоновых условиях. Приведена причина выбора вейвлет-преобразований для обнаружения космического мусора на изображении. Для решения задачи обнаружения обоснован выбор обратного биортогонального вейвлета 1.3 при условии обнаружения минимального числа ложных областей без космического мусора. Для достижения цели локализации однородных областей на нестационарных изображениях описан принцип идентификации структурных особенностей. Анализ изображения вейвлет-преобразованиями дает возможность решить ряд задач, связанных с выделением локальных пространственных неоднородностей, уменьшением уровня шума и анализом текстур. Таким образом, предложенный метод является обоснованием решения задачи обнаружения космического мусора при различных фоновых условиях функционирования оптико-электронной системы космического аппарата.

Ключевые слова: космический мусор, оптико-электронная система, вейвлет-преобразования, обработка изображений, фоновые шумы.

ВВЕДЕНИЕ

Работа энергоустановки космического аппарата оказывает влияние на оптико-электронную систему (ОЭС), при этом возникают ситуации со сложными фоновыми условиями, порождающие искажения от возникающих шумов при регистрации изображений в космическом пространстве. Для преодоления искажений на полученных изображениях целесообразно использовать вейвлет-преобразования, ввиду того что вейвлеты направлены на анализ различных нестационарных сигналов, таких как, например, изображения космического мусора с фоновыми помехами [1]. Анализ изображений вейвлет-преобразованиями помогает решить задачи уменьшения уровня шума, выделения локальных пространственных неоднородностей и анализа текстур [2].

Возможность анализа локализованной области в большом сигнале является одним из главных преимуществ вейвлетов. Если сравнивать вейвлет-анализ с другими методами анализа сигналов, то он способен выявить некоторые особенности данных: точки разрыва, резкие нелинейности и самоподобие. Вейвлеты дают возможность выделить одновременно как высокочастотные характеристики сигнала, так и низкочастотные составляющие. Это дает существенное преимущество в задачах обработки изображений, например, в сравнении с оконным преобразованием Фурье, где производится варьирование ширины окна и существует требование выбора масштаба, выделяющего особенности в анализируемом сигнале. В то же время в результате вейвлет-преобразования одномерного ряда формируется двумерный массив амплитуд. Распределение полученных значений в пространстве «временная локализация – временной масштаб» дает информацию об изменении относительного вклада компонент разного масштаба во времени и называется вейвлет-спектром, или спектром коэффициентов вейвлет-преобразования [3].

Если учитывать вид базисной функции, то частотно-временные различия между вейвлет-преобразованием и преобразованием Фурье становятся понятны. Для оконного преобразования Фурье окном будет являться простая квадратная волна. Но у окна квадратной волны обязательно будут обрезаны косинус или синус для соответствия окну определенной ширины, потому что одно и то же окно используется для всех частот и точность анализа для всех участков в частотно-временной плоскости будет оставаться постоянной [4, 5].

Главное преимущество вейвлет-преобразования – это то, что окна не имеют постоянной формы и могут изменять свой размер. Для того чтобы достичь цели нахождения разрывов сигнала, требуется иметь короткие базисные функции. Но в то же время необходимо иметь длинные базисные функции с целью получения подробного анализа частоты. Самым простым из способов, позволяющих получить такие результаты, является наличие длинных низкочастотных и коротких высокочастотных базисных функций [6]. Цель настоящей работы – на основе анализа изображения вейвлет-преобразованиями решить ряд задач, связанных с выделением локальных пространственных неоднородностей, уменьшением уровня шума и анализом текстур.

ВЫБОР БАЗИСНОЙ ФУНКЦИИ

В отличие от преобразования Фурье, которое использует только функции косинуса и синуса, вейвлет-преобразования не обладают единым набором базисных функций. Выбор базисной функции играет важную роль в задачах обнаружения, так как вейвлет-преобразования имеют бесконечное множество разнообразных базисных функций. В отличие от других частотно-временных методов (например, анализа Фурье), при использовании вейвлет-анализа обеспечивается немедленный доступ к информации, которая не будет скрытой. Выбор семейства вейвлетов играет важнейшую роль в шумоподавлении и обнаружении характерных для космического мусора структур.

Обычно вейвлеты – это функции, позволяющие за счет использования при анализе сдвигов и растяжений образовывать базис многих важных пространств. К этому числу относится и ортогональный базис $L^2(R)$. Эти функции являются компактными как в частотной области, так и во временной. Вейвлеты в большей степени связаны с кратномасштабным анализом сигналов. Вейвлеты бывают биортогональными, ортогональными и полуортогональными. Все эти функции по виду бывают симметричными, асимметричными и несимметричными. Также вейвлеты могут быть либо с компактной областью определения, либо могут не иметь таковой. Некоторые функции работают на основе быстрого алгоритма вычисления связанного с ними вейвлет-преобразования, другие имеют аналитическое выражение. Также у вейвлетов может различаться степень гладкости. С точки зрения практического использования идеальными были бы ортогональные симметричные или асимметричные вейвлеты, но, к сожалению, по доказанной теореме, к таким вейвлетам относятся лишь вейвлеты Хаара [7]. По основным возможностям осуществляется классификация вейвлет-анализа данных.

Для прямого вейвлет-преобразования характерно содержание комбинированной информации об анализирующем вейвлете и анализируемом сигнале. Получить объективную информацию о сигнале вейвлет-преобразование позволяет, так как от выбора вейвлета, проводящего анализ, не зависят некоторые простые свойства вейвлет-преобразования. Это является важным, потому что свойства сигнала независимы от вейвлета. В основном к вейвлетам относятся локализованные функции, которые

конструируются путем операций сдвига по аргументу b и масштабного изменения a из одного материнского вейвлета $\psi(t)$ (или по любой другой независимой переменной):

$$\psi_{ab}(t) = (1/\sqrt{|a|})\psi((t - b)/a), \quad (a, b) \in R, \quad \psi(t) \in L2(R), \quad (1)$$

где для обеспечения независимости нормы функций от масштабного числа ' a ' используется множитель $(1/\sqrt{|a|})$. В отличие от Фурье-спектра, вейвлетный масштабно-временной спектр $S(a, b)$ является функцией аргументов масштаба вейвлета ' a ' и временного смещения вейвлета по сигналу ' b ', которые могут принимать любые значения в пределах областей их определения [8]. Масштаб вейвлета ' a ' измеряется в единицах, обратных частоте, а временное смещение вейвлета по сигналу ' b ' – в единицах времени.

Вейвлеты Морле, «мексиканской шляпы» и гауссова типа – это «грубые» вейвлеты с минимумом свойств, характерных для вейвлетов. Поэтому «грубые» вейвлеты не обладают полноценными возможностями. В частности, возможна непрерывная декомпозиция, анализ не будет ортогональным.

Вейвлеты Мейера относятся к бесконечным регулярным вейвлетам. Для них характерны следующие свойства: быстрый алгоритм преобразований не поддерживается; их анализ ортогональный; вейвлеты симметричны и регулярны в бесконечности. Также к бесконечным регулярным вейвлетам относится дискретный вейвлет Мейера. Его свойства: поддержка непрерывного и дискретного преобразований; аппроксимация фильтром класса FIR.

К ортогональным вейвлетам с компактным носителем относятся вейвлеты Добеши, Симлета и Койфлета. Для них характерны основные свойства: обеспечение принципиальной возможности реконструкции сигналов и функций; возможность непрерывного преобразования и дискретного преобразования с применением быстрого вейвлет-преобразования.

К биортогональным парным вейвлетам с компактным носителем относятся В-сплайновые биортогональные вейвлеты. Симметрия с фильтрами, желаемые свойства для разложения и восстановления разделены (это наиболее существенные их достоинства). Отсутствие ортогональности является недостатком этих вейвлетов.

К группе комплексных вейвлетов относятся следующие: Морле, Гаусса, Шеннона и частотные В-сплайновые вейвлеты. Для них характерны минимальные свойства: возможность анализа типа комплексной декомпозиции; неортогональный анализ. Для этой группы вейвлетов недоступны быстрый алгоритм и реконструкция.

На основании проведенных исследований на изображениях с космическим мусором были сделаны следующие выводы:

вейвлеты Мейера и дискретный вейвлет Мейера (бесконечные регулярные вейвлеты) разбивают исходную область на изображении с космическим мусором на множество частей, что приводит к уменьшению информативности о космическом мусоре;

как и предыдущее семейство, «грубые» вейвлеты не подходят для решения задачи обнаружения космического мусора ввиду того, что обладают минимумом свойств, которыми должны обладать вейвлеты (к вейвлетам данного семейства относятся Морле, вейвлеты гауссова типа и «мексиканской шляпы»);

вейвлет Хаара, являющийся ортогональным симметричным вейвлетом, и вейвлеты Добеши, входящие в семейство ортогональных вейвлетов с компактным носителем, подходят для решения задачи обнаружения космического мусора, но при помощи вейвлетов Добеши намного труднее выполнять операции обнаружения из-за их

асимметричности, вследствие чего уменьшается область обнаружения с возрастанием порядка; соответственно, информативность о космическом мусоре также уменьшается (рис. 1).

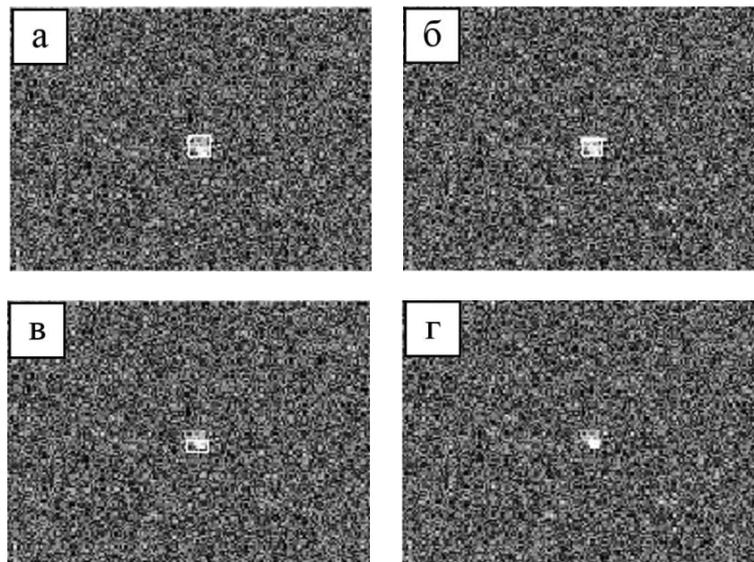


Рис. 1. Пример обнаруженных областей с космическим мусором: а – реальная; б – обнаруженная вейвлетом Хаара; в – обнаруженная вейвлетом Добеши 2; г – обнаруженная вейвлетом Добеши 4

Вейвлеты Симлета (совпадают с вейвлетами Добеши низких порядков) и Койфлета (вейвлеты Добеши с нулевыми моментами скейлинг-функции), являющиеся частными случаями вейвлетов Добеши, относятся к семейству ортогональных вейвлетов с компактным носителем. Вейвлеты Койфлета, так же как и вейвлеты Симлета, являются асимметричными и с возрастанием их порядка уменьшается область обнаружения и как следствие уменьшается информативность о космическом мусоре (рис. 2).

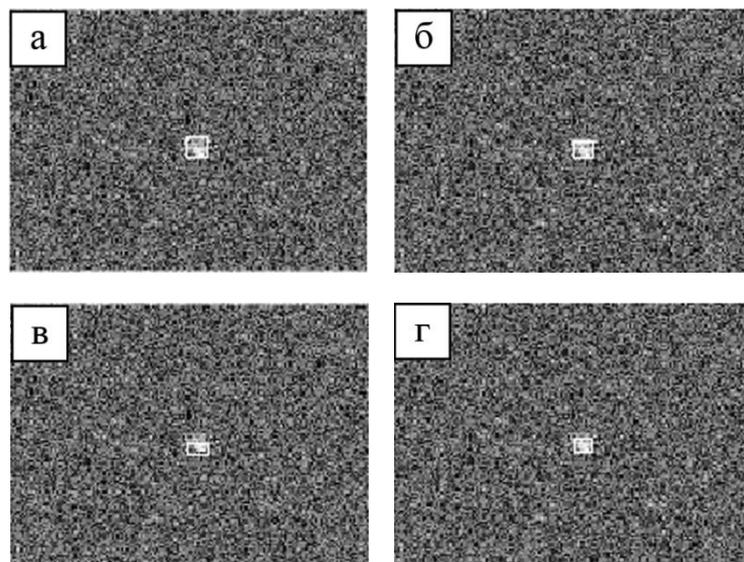


Рис. 2. Пример обнаруженных областей с космическим мусором: а – реальная; б – обнаруженная вейвлетом Симлета 1; в – обнаруженная вейвлетом Симлета 2; г – обнаруженная вейвлетом Койфлета 1

Семейство биортогональных парных вейвлетов с компактным носителем имеет лучшие результаты из-за того, что, в отличие от вейвлетов Хаара, обнаруживает меньшее число ложных областей с фоновыми шумами, а в точности координат накрываемой области с космическим мусором практически полностью повторяет реальную занимаемую область (рис. 3).

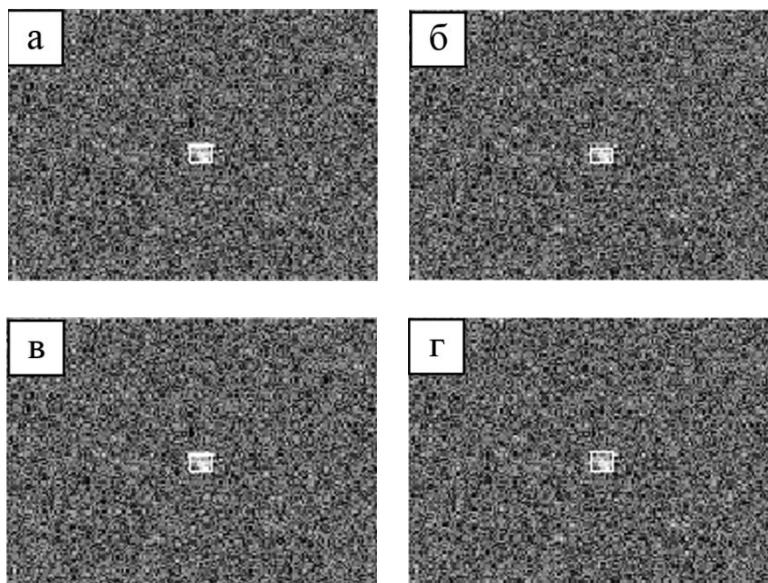


Рис. 3. Пример обнаруженных областей с космическим мусором: а – биортогональным вейвлетом 1.1; б – биортогональным вейвлетом 1.3; в – обратным биортогональным вейвлетом 1.1; г – обратным биортогональным вейвлетом 1.3

Основным выводом при исследовании базовых функций вейвлетов является то, что для решения задачи обнаружения областей с космическим мусором лучше всего подходят биортогональные и обратные биортогональные вейвлеты, вейвлет Хаара. Но ввиду того что требуется обнаружение минимума ложных областей, то целесообразней для задачи обнаружения применять обратный биортогональный вейвлет 1.3.

ИДЕНТИФИКАЦИЯ СТРУКТУРНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ

С целью достижения задачи локализации областей на изображениях с космическим мусором, полученных с помощью ОЭС, выполняется идентификация структурных особенностей. В системе координат изображения, полученного с ОЭС, локализуются структурные особенности. Операция сегментации сводится к выполнению следующих свойств: максимальное соотношение значений яркости космического мусора к яркости фоновых помех; высокая частотная и пространственная разрешающие способности (рис. 4).

Максимальное соотношение значений яркости космического мусора к яркости фоновых помех достигается при сегментации изображения за счет вейвлет-преобразований столбцов, строк и одной из диагоналей. Также известно, что принцип неопределенности Гейзенберга в меньшей степени воздействует на вейвлет-преобразования. Принцип неопределенности Гейзенберга характеризует то, что нельзя определить, для какого момента времени и какие спектральные компоненты присутствуют в сигнале, то есть невозможно получить произвольно точное частотно-временное представление сигнала. Но в то же время существует возможность определения временных интервалов, в течение которых в сигнале существуют полосы частот [9]. Следовательно, при использовании вейвлет-преобразований уменьшается

влияние описываемого принципа на полученном частотно-временном представлении сигнала. С его помощью высокие частоты имеют более детальное представление относительно частоты, а низкие – относительно времени [10].

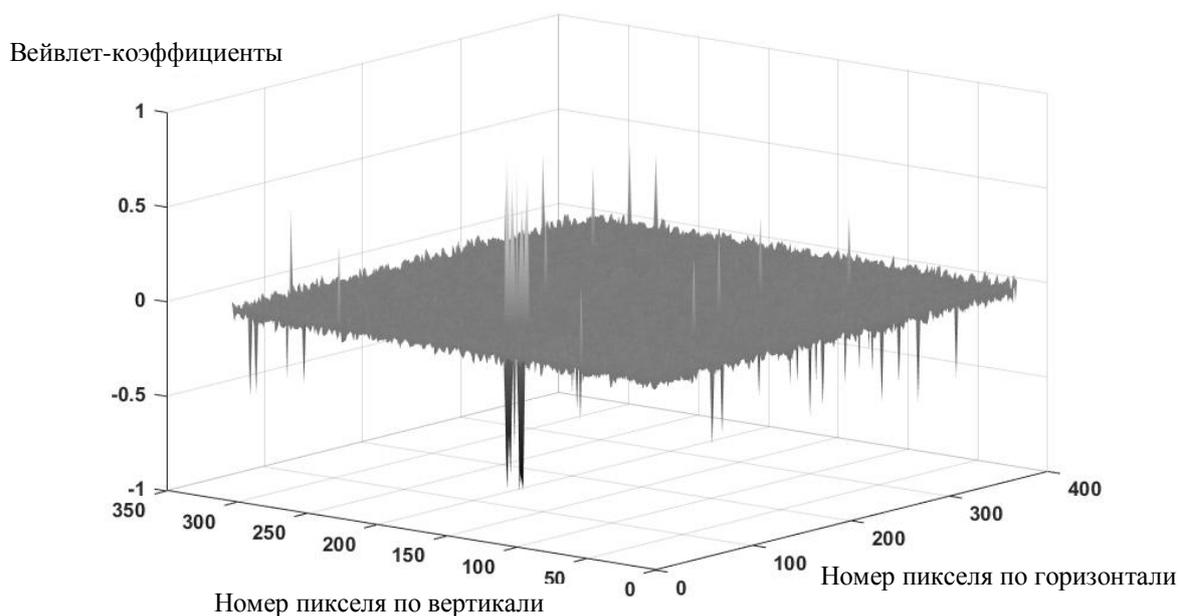


Рис. 4. Массив вейвлет-коэффициентов

Так как на анализируемых изображениях присутствуют фоновые помехи и сами вейвлет-преобразования производятся без введения априорной информации о них в зоне контроля ОЭС, то вследствие этого могут обнаруживаться ложные области без космического мусора.

По областям вейвлет-коэффициентов столбцов, строк и одной из диагоналей изображения идентификация структурных особенностей изображений реализуется практически безошибочно (рис. 5). Это подтверждается решением задачи непараметрической идентификации структурных особенностей столбцов, строк и одной из диагоналей изображения как достаточным и необходимым условием отношения предпочтения.

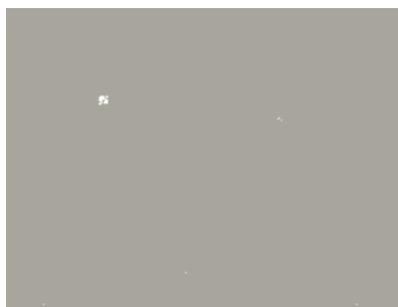


Рис. 5. Результат сегментации изображения

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основной причиной использования вейвлет-преобразований для идентификации космического мусора по изображениям являются теоретические и практические выводы о том, что вейвлеты – один из лучших методов для анализа различных нестационарных сигналов. На основе вейвлет-преобразования обработка изображения

позволяет решить ряд задач, связанных с уменьшением уровня шума, выделением локальных пространственных неоднородностей, а также анализом текстур. Но к главному преимуществу, предоставляемому вейвлетом, относится возможность представлять локальный анализ, то есть анализировать локализованную область в большом сигнале. Резкие нелинейности в высших гармониках, точки разрыва и самоподобие – все это способен выявлять вейвлет-анализ. После операции локализации области изображений вейвлет-преобразованиями будут иметь произвольную форму, но информативность не будет нарушаться при изменении фоновых условий. С учетом требуемой скорости обнаружения описанный метод может быть включен в состав методов, используемых на разрабатываемых космических аппаратах.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проект № 2.1777.2017/4.6.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гузенко О.Б., Храмичев А.А. Анализ особенностей фоноцелевой обстановки в задаче обнаружения динамических объектов в оптическом диапазоне. *Вестник Концерна ПВО «Алмаз-Антей»*. 2015. № 2.
2. Алексеев В.В., Коновалова В.С., Калякин И.В. Реализация дискретного вейвлет-преобразования в реальном времени. *Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ»*. 2017. № 6. С. 68–72.
3. Добеши И. Десять лекций по вейвлетам. М.: РХД. 2001. 461 с.
4. Грибунин В.Г. Введение в анализ данных с применением дискретного вейвлет-преобразования. Новосибирск. 2001. 54 с.
5. Graps A. An Introduction to Wavelets. *Computational Science and Engineering*. 1995. V. 2, № 2. P. 2–18.
6. Валеев С.Г., Вершилкина Е.А. Применение вейвлета при обработке. М. 2008. 102 с.
7. Иванов М.А. Новые информационные технологии в науке и образовании. *Применение вейвлет-преобразований в кодировании изображений*. 2011. С. 157–175.
8. Астафьева Н.М. Вейвлет-анализ: основы теории и примеры применения. *Успехи физических наук*. Т. 166. № 11. 1996. С. 1145–1170.
9. Яковлев А.Н. Введение в вейвлет-преобразование: учебное пособие. Новосибирск: НГТУ, 2003. 104 с.
10. Смоленцев Н.К. Основы теории вейвлетов. Вейвлеты в MATLAB. М.: ДМК-Пресс. 2005. 304 с.

DETECTION OF AREAS WITH SPACE JUNK ON WAVELET TRANSFORM IMAGE

I.I. ZYKOV, Cand Sci

Tver State Technical University, 22, Af. Nikitin emb.,
170026, Tver, Russian Federation, e-mail: kemer0802@mail.ru

The article is dedicated to the problem of space debris detection on the images obtained by the optoelectronic system of the spacecraft in complex background conditions. This problem is quite important for the further development of outer space. Here was given a

reason for the choice of wavelet transforms to detect space debris in the image. To solve the detection problem, the choice of the inverse biorthogonal wavelet 1.3 is justified, provided that the minimum number of false regions without space debris is detected. To achieve the goal of localization of homogeneous regions on non-stationary images, the principle of identification of structural features is described. The analysis of the image by wavelet transforms makes it possible to solve a number of problems related to the allocation of local spatial inhomogeneities, noise reduction and texture analysis. Thus, the proposed method is a justification for solving the problem of space debris detection under different background conditions of operation of the optoelectronic system of the spacecraft.

Keywords: space debris, optical-electronic system, wavelet transform, image processing, background noise.

ACKNOWLEDGMENTS

This work was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, project № 2.1777.2017/4.6.

REFERENCES

1. Guzenko O.B., Khramichev A.A. Analysis of the features of the phono-target situation in the problem of detecting dynamic objects in the optical range. *Vestnik Koncerna PVO «Almaz-Antej»*. 2015. No 2. (In Russian).
2. Alekseev V.V., Konovalova V.S., Kalyakin I.V. Real-time discrete wavelet transform. *Izvestiya SPbGEHTU «LEHTI»*. 2017. No 6, pp. 68–72.
3. Dobeshi I. Ten Wavelet Lectures [Desyat' lekcij po vejjvletam]. Moscow: RHD. 2001. 461 p.
4. Gribunin V.G. Introduction to data analysis using discrete wavelet transform [Vvedenie v analiz dannyh s primeneniem diskretnogo vejjvlet-preobrazovaniya]. Novosibirsk. 2001. 54 p.
5. Graps A. An Introduction to Wavelets. *Computational Science and Engineering*. V. 2, No. 2. 1995, pp. 2–18.
6. Valeev S.G., Vershilkina E.A. Applying wavelet while processing [Primenenie vejjvleta pri obrabotke]. Moscow. 2008. 102 p.
7. Ivanov M.A. New information technologies in science and education. *Primenenie vejjvlet-preobrazovanij v kodirovanii izobrazhenij*. 2011, pp. 157–175.
8. Astafieva N.M. Wavelet Analysis: Fundamentals of Theory and Application Examples. *Uspekhi fizicheskikh nauk*, V. 166. No 11. 1996, pp. 1145–1170.
9. Yakovlev A.N. Introduction to wavelet transform. Tutorial [Vvedenie v vejjvlet-preobrazovanie. Uchebnoe posobie]. Novosibirsk: NGTU. 2003. 104 p.
10. Smolentsev N.K. Fundamentals of the theory of wavelets. Wavelets in matlab. [Osnovy teorii vejjvletov. Vejjvlety v MATLAB]. DMK-Press. 2005. 304 p.

НОВОЕ В ИНЖЕНЕРНОМ ОБРАЗОВАНИИ

УДК 62:378.1

О ПОДГОТОВКЕ СПЕЦИАЛИСТОВ В СФЕРЕ «ИНЖЕНЕРНОЕ ДЕЛО, ТЕХНОЛОГИИ И ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ» ПО ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫМ ПРОГРАММАМ С УЧЕТОМ ПРОФЕССИОНАЛЬНЫХ СТАНДАРТОВ

М.А. КОРОТКОВ, канд. техн. наук

Тверской государственной технической университет,
170026, Тверь, наб. А. Никитина, 22, e-mail: mikhalkor@yandex.ru

В контексте международной практики гармонизации профессиональных и образовательных квалификаций рассматривается проводимая в последние два года деятельность по сопряжению федеральных государственных образовательных стандартов с профессиональными стандартами. Координация этой деятельности осуществляется под руководством Национального совета по профессиональным квалификациям при президенте Российской Федерации. Рассмотрены вопросы согласования федеральных государственных образовательных стандартов высшего образования в области образования «Инженерное дело, технологии и технические науки» и профессиональных стандартов. В статье изложены основные отличия федеральных государственных образовательных стандартов с учетом профессиональных стандартов от предшествующих образовательных стандартов.

Ключевые слова: федеральные государственные образовательные стандарты высшего образования, профессиональные стандарты, образовательные программы высшего образования, система компетенций.

ВВЕДЕНИЕ

Подготовка кадров в любой стране держится на двух «столпах»: системе профессионального образования и национальной системе квалификаций. Очевидно, что без согласования этих двух систем подготовка кадров одна из важнейших задач государства с точки зрения устойчивого развития страны, ее конкурентоспособности и безопасности не будет выполняться эффективно [1].

В настоящее время обучение студентов в вузах осуществляется по образовательным программам высшего образования, соответствующим федеральным государственным образовательным стандартам высшего образования третьего поколения (далее – ФГОС ВО). Отличительной особенностью образовательных программ и ФГОС ВО является то, что они не ориентированы непосредственно на профессиональные стандарты (далее – ПС), являющиеся элементом национальной системы квалификаций. В силу этого образовательные программы высшего образования (далее – ОП ВО) не имеют направленности на подготовку выпускников к выполнению трудовых функций, предусмотренных в ПС. Существенным является прекращение с 31.12.2018 г. приема на обучение на образовательные программы, которые соответствуют ФГОС ВО.

Начиная с приема на обучение в 2019 г. в вузах будут реализовываться ОП ВО, соответствующие федеральным государственным образовательным стандартам высшего образования третьего поколения с учетом профессиональных стандартов (далее – ФГОС ВО 3++). Переход на эти стандарты осуществляется во исполнение Федерального закона от 29.12.2012 г. № 273-ФЗ «Об образовании в Российской Федерации». Данный закон содержит ст. 11 ч. 7 «Формирование требований федеральных государственных образовательных стандартов профессионального образования к результатам освоения основных образовательных программ профессионального образования в части профессиональной компетенции осуществляется на основе соответствующих профессиональных стандартов (при наличии)».

ФЕДЕРАЛЬНЫЕ ГОСУДАРСТВЕННЫЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ СТАНДАРТЫ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ ТРЕТЬЕГО ПОКОЛЕНИЯ

Федеральные государственные образовательные стандарты высшего образования третьего поколения содержат требования к результатам освоения образовательной программы, представляющие собой набор общекультурных, общепрофессиональных и профессиональных компетенций, которыми должен обладать выпускник [2].

Следует отметить, что термин «общекультурные компетенции» неоднозначен применительно к системе высшего образования. В смысловом плане общекультурные компетенции отражают нечто общее, характерное требование к выпускнику высшего учебного заведения, независимо от области профессиональной деятельности. Это социальное ожидание того, что молодой специалист, вступая в социальную жизнь, разделяет основополагающие ценности этого общества: патриотизм и гражданственность, высокие морально-нравственные характеристики, общую языковую и правовую культуру, ценности гуманизма и экологического сознания.

Общепрофессиональные компетенции устанавливают требования к результатам освоения ОП ВО по направлению подготовки в целом без привязки к виду профессиональной деятельности и направленности (профиля) образования.

Профессиональные компетенции устанавливают требования к результатам освоения ОП ВО, соответствующим виду профессиональной деятельности, на который ориентирована образовательная программа. При разработке ОП ВО вуз вправе дополнить набор профессиональных компетенций выпускников с учетом направленности (профиля) программы. Однако во ФГОС ВО не предусмотрено включение компетенций, связанных с выполнением конкретных трудовых функций, соответствующих профессиональной деятельности выпускника. В силу этого начало исполнения трудовых функций в профессиональной деятельности выпускника связано, как правило, с адаптационным периодом той или иной продолжительности. Адаптация выпускников реализуется такими формами, как корпоративное и внутрифирменное обучение персонала для выполнения конкретных задач, переподготовка и дополнительное образование, бизнес-образование, выполнение трудовых функций под контролем более компетентного работника.

Важным является то, что функция разработки ФГОС ВО осуществлялась Минобрнауки России силами образовательного сообщества в лице учебно-методических объединений и научно-методических советов. К разработке ФГОС ВО привлекались и некоторые представители работодателей.

ФЕДЕРАЛЬНЫЕ ГОСУДАРСТВЕННЫЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ СТАНДАРТЫ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ ТРЕТЬЕГО ПОКОЛЕНИЯ С УЧЕТОМ ПРОФЕССИОНАЛЬНЫХ СТАНДАРТОВ

Главенствующая составляющая процессов, происходящих в России, с очевидностью направлена на обеспечение долгосрочной конкурентоспособности в борьбе за превосходство и лидерство в мире. Одной из ключевых проблем в этом процессе явилось отсутствие регулятивного механизма для адекватного использования самого основного капитала – работника. В результате президенту и правительству пришлось организовать на основании опыта мирового сообщества переход на регулятивный механизм использования человеческого потенциала, в основу которого заложены профессиональные стандарты как альтернатива использовавшимся ранее квалификационным характеристикам, изложенным в ЕКС и ОКСО. Профессиональный стандарт (ПС) выступает в качестве нормативной характеристики квалификации, необходимой для осуществления определенного вида профессиональной деятельности, в том числе определенной трудовой функции. Он представляет собой многофункциональный документ, используемый в сферах труда, занятости, профессионального образования и обучения. Функции ПС аккумулируют, по сути, все указанные сферы и влияют в конечном итоге на качество рабочей силы, эффективность функционирования самих этих сфер. Появление профессиональных стандартов – это не новинка, придуманная именно в России, а сложившаяся мировая практика.

Задача введения профессиональных стандартов (далее – ПС) заключается в преобразовании системы квалификаций и компетенций работников в систему, заменяющую устаревшие единые квалификационные справочники. Уровни квалификации в целях разработки профессиональных стандартов утверждены Приказом Минтруда РФ от 12.04.2013 г. № 148н. Они содержат описание следующих показателей: «Полномочия и ответственность», «Характер умений», «Характер знаний», «Основные пути достижения уровня квалификации». Уровни квалификации определяют требования к умениям, знаниям, уровню компетенции в зависимости от полномочий и ответственности работника (его компетентности в профессиональной деятельности).

Так, 7-й уровень квалификации, достигаемый образовательной программой высшего образования (программой бакалавриата), предполагает самостоятельную деятельность, направленную на определение задач собственной работы и/или подчиненных по достижению цели; обеспечение взаимодействия сотрудников и смежных подразделений; ответственность за результат выполнения работ на уровне подразделения или организации. Уровень соответствует характеру умений – разработки, внедрения, контроля, оценки и корректировки направлений профессиональной деятельности, технологических или методических решений. Уровень предполагает наличие профессиональных знаний технологического или методического характера (в том числе инновационных) и самостоятельный поиск, анализ и оценку профессиональной информации.

8-й уровень квалификации, достигаемый образовательной программой высшего образования (программой специалитета или программой магистратуры), предполагает определение стратегии, управление процессами и деятельностью (в том числе инновационной) с принятием решения на уровне крупных организаций или подразделений и ответственность за результаты деятельности крупных организаций или подразделений. Уровень соответствует характеру умений: решение задач развития области профессиональной деятельности и (или) организации с использованием разнообразных методов и технологий (в том числе инновационных); разработка новых

методов, технологий. Уровень предполагает наличие профессиональных знаний технологического или методического характера (в том числе инновационных) и самостоятельного поиска, анализа и оценки профессиональной информации.

Переход на федеральные государственные образовательные стандарты высшего образования третьего поколения с учетом профессиональных стандартов напрямую связан с внедрением ПС в сфере труда. В январе 2015 г. был принят ряд документов, в частности «Методические рекомендации по актуализации действующих федеральных государственных образовательных стандартов высшего образования с учетом принимаемых профессиональных стандартов» [3] и «Методические рекомендации по разработке основных профессиональных образовательных программ и дополнительных профессиональных программ с учетом соответствующих профессиональных стандартов» [4], в которых сформулирована задача и предложена методика совершенствования образовательных стандартов и образовательных программ на основе положений профессиональных стандартов.

Претерпел существенные изменения и порядок разработки ФГОС ВО 3+-. Разработка проекта образовательного стандарта, как и ранее, является функцией Минобрнауки России и его подразделений (координационные советы по областям образования и федеральные учебно-методические объединения). Но теперь проекты образовательного стандарта в обязательном порядке рецензируются и согласовываются с советами по профессиональным квалификациям и с Национальным советом по профессиональным квалификациям при президенте РФ. Одной из функций этих советов является также организация разработки, рецензирование и согласование профессиональных стандартов. Непосредственная деятельность по разработке ПС возложена на ведущие организации сферы труда без участия в этой деятельности работников сферы профессионального образования.

Во ФГОС ВО 3++ изменились требования к результатам освоения образовательной программы, которые теперь представляют собой набор универсальных общепрофессиональных и профессиональных компетенций, которыми должен обладать выпускник [5]. Изменились и смысловые трактовки компетенций:

универсальные компетенции отражают запросы общества и личности к общекультурным и социально-личностным качествам выпускника программы высшего образования соответствующего уровня, а также включают профессиональные характеристики, определяющие встраивание уровня образования в национальную систему профессиональных квалификаций;

общепрофессиональные компетенции отражают запросы рынка труда в части владения выпускниками программ высшего образования по направлению (специальности) подготовки базовыми основами профессиональной деятельности с учетом потенциального развития области или областей деятельности (независимо от ориентации программы на конкретные объекты деятельности или области знания);

профессиональные компетенции отражают запросы рынка труда в части готовности выпускника программы высшего образования соответствующего уровня и направления подготовки выполнять определенные задачи профессиональной деятельности и связанные с ними трудовые функции из профессиональных стандартов (при наличии) для соответствующего уровня профессиональной квалификации. При этом во всех ФГОС ВО 3++, в отличие от ранее действующих образовательных стандартов, полностью отсутствует перечень профессиональных компетенций.

Теперь эти компетенции, устанавливаемые образовательной программой, формируются на основе ПС, соответствующих профессиональной деятельности выпускников (при наличии), а также при необходимости на основе анализа требований

к профессиональным компетенциям, предъявляемым к выпускникам на рынке труда, обобщения отечественного и зарубежного опыта, проведения консультаций с ведущими работодателями, объединениями работодателей отрасли, в которой востребованы выпускники, иных источников [5].

В целом образовательная программа высшего образования должна быть направлена на формирование у выпускника следующих способностей:

Личностное развитие гражданина, соответствующее общим требованиям, предъявляемым к образованности бакалавра, предполагает раскрытие интеллектуального и духовно-нравственного потенциала, формирование готовности к активной профессиональной и социальной деятельности, системность профессионального мышления, инновационную открытость, способность к самостоятельному приращению имеющихся знаний, способность адаптироваться к изменяющимся условиям профессиональной деятельности.

Готовность решать сложные профессиональные задачи, которые:

не могут быть решены без применения фундаментальных научных и углубленных инженерных знаний;

не имеют очевидных решений, требуют развитого абстрактного мышления и оригинальности анализа;

требуют использования аналитического подхода, основанного на фундаментальных принципах;

охватывают интересы различных заинтересованных групп лиц;

предполагают использование творческого подхода в применении знаний в области профессиональной деятельности (для программы магистратуры дополнительно требуются навыки выполнения научно-исследовательской деятельности).

Способность осуществлять профессиональную деятельность непосредственно после освоения образовательной программы в части выполнения обобщенных трудовых функций и трудовых функций, предусмотренных соответствующим ПС.

Способность осуществлять не предусмотренную образовательной программой профессиональную деятельность, относящуюся к направлению подготовки, после освоения дополнительной профессиональной программы и/или приобретения опыта практической работы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Все новые и новые поколения федеральных государственных образовательных стандартов высшего образования необходимы в качестве инструмента непрерывного сближения профессионального образования и рынка труда. Модернизация национальной системы квалификаций открывает дополнительные возможности для решения проблем качества профессионального образования, поскольку требования работодателей, отраженные в профессиональных стандартах, становятся более четкими. Однако такое практико-ориентированное образование не уменьшает значимости фундаментальности высшего образования, его форсайтной направленности на создание «прорывных» технологий для смены технологического уклада и выхода России из экономической стагнации. Личностное развитие, раскрытие интеллектуального и духовно-нравственного потенциала, формирование готовности к активной профессиональной и социальной деятельности, системности профессионального мышления, инновационной открытости, способности к самостоятельному приращению имеющихся знаний остаются одними из основных задач университетского образования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Белоцерковский А.В. К вопросу о согласовании образовательных и профессиональных стандартов. *Высшее образование в России*. 2015. № 6. С. 26–31.
2. Об утверждении Федерального государственного образовательного стандарта высшего образования по направлению подготовки 08.03.01 Строительство (уровень бакалавриата). Приказ Минобрнауки России от 12.03.2015 г. № 201. URL: <http://fgosvo.ru/uploadfiles/fgosvob/080301.pdf>
3. Методические рекомендации по актуализации действующих федеральных государственных образовательных стандартов высшего образования с учетом принимаемых профессиональных стандартов, утвержденные министром образования Российской Федерации Ливановым Д.В. от 22.01.2015 № ДЛ 02/05вн. URL: <http://fgosvo.ru/support/43/5/8/>
4. Методические рекомендации по разработке основных профессиональных образовательных программ и дополнительных профессиональных программ с учетом соответствующих профессиональных стандартов, утвержденные министром образования Российской Федерации Ливановым Д.В. от 22.01.2015 № ДЛ 01/05вн. URL: <http://fgosvo.ru/support/43/5/8/>
5. Об утверждении Федерального государственного образовательного стандарта высшего образования – бакалавриат по направлению подготовки 08.03.01 Строительство. Приказ Минобрнауки России от 31.05.2017 г. № 481. URL: http://fgosvo.ru/uploadfiles/FGOS%20VO%203++/Bak/080301_B_3_27062017.pdf

ON THE TRAINING OF SPECIALISTS IN THE FIELD OF «ENGINEERING, TECHNOLOGY AND TECHNICAL SCIENCES» FOR EDUCATIONAL PROGRAMS BASED ON PROFESSIONAL STANDARDS

M.A. KOROTKOV, Cand Sci

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

In the context of the international practice of harmonization of professional and educational qualifications, the work carried out in the last two years on the integration of Federal state educational standards with professional standards is considered. This activity is coordinated under the leadership of The National Council for professional qualifications under the President of the Russian Federation. The issues of coordination of Federal state educational standards of higher education in the field of education "Engineering, technology and technical Sciences" and professional standards are considered. The article describes the main differences of the federal state educational standards with regard to professional standards from previous educational standards.

Keywords: Federal state educational standards of higher education, professional standards, educational programs of higher education; system of competences.

REFERENCES

1. Belotserkovskiy A.V. On coordination of educational and professional standards. *Vysshee obrazovanie v Rossii*. 2015. No 6, pp. 26–31. (In Russian).
2. About the approval of the Federal state educational standard of the higher education in the direction of preparation 08.03.01 Construction (bachelor level). Order of the Ministry of education and science of 12.03.2015. No 201. (In Russian). URL: <http://fgosvo.ru/uploadfiles/fgosvob/080301.pdf>
3. Methodical recommendations on updating the existing Federal state educational standards of higher education taking into account the accepted professional standards, approved by the minister of education of the Russian Federation Livanov D.V.]. 22.01.2015. No DL 02/05vn. URL: <http://fgosvo.ru/support/43/5/8/> (In Russian).
4. Methodologic recommendations on elaborating of basic professional educational programs and additional professional programs taking into account the relevant professional standards, approved by the minister of education of the Russian Federation Livanov D.V. 22.01.2015, No. DL 01/05vn. URL: <http://fgosvo.ru/support/43/5/8/> (In Russian).
5. About the approval of the Federal state educational standard of the higher education-the bachelor degree in the direction of preparation 08.03.01 Construction. Order of the Ministry of education and science of 31.05.2017. No 481. (In Russian). URL: http://fgosvo.ru/uploadfiles/FGOS%20VO%203++/Bak / 080301_B_3_27062017.pdf.

**ВЕСТНИК
ТВЕРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА**

Серия «Технические науки»

**Научный рецензируемый журнал
№ 2 (2), 2019**

Редактор Е.Н. Спиридонова
Корректор Я.А. Петрова
Технический редактор Ю.Ф. Воробьева

Редакционно-издательский центр
Тверского государственного технического университета
170026, Тверь, наб. Афанасия Никитина, 22