

Вып. 3 (74)'2021 ПРОГРЕССИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ МАШИНОСТРОЕНИЯ



ISSN 2073-3216  
(E) ISSN 2518-7120

ДОНЕЦКИЙ  
НАЦИОНАЛЬНЫЙ  
ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ

## ПРОГРЕССИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ МАШИНОСТРОЕНИЯ

Международный  
сборник научных трудов

Выпуск 3 (74)' 2021



ДОНЕЦК - 2021

ISSN 2073-3216  
(E) ISSN 2518-7120

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ ДНР  
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

---

*Посвящается 100-летию юбилею ДОННТУ*

# **ПРОГРЕССИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ МАШИНОСТРОЕНИЯ**

Международный сборник научных трудов

Основан в декабре 1994 года

Выходит 4 раза в год

**Выпуск 3 (74)' 2021**

**Донецк – 2021**

## УДК 621.01(06)

Рекомендован к изданию Ученым Советом Донецкого национального технического университета (протокол № 5 от 4 июня 2021 г.)

В международном сборнике научных работ приведены некоторые вопросы теории и практики обработки изделий прогрессивными методами, показаны достижения и пути развития технологического оборудования, оснастки, металлорежущего инструмента и нанесения специальных покрытий на изделия машиностроения. Рассмотрены отдельные аспекты автоматизации производственных процессов и надежности технологического оборудования. Освещены современные проблемы материаловедения в машиностроении.

В данном сборнике публикуются ученые и ведущие специалисты из различных стран мира. Предназначен для научно-технических работников, ИТР и специалистов в области машиностроения.

**Учредитель и издатель – ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»** (Свидетельство о государственной регистрации юридического лица от 07.04.2016 г. № 029192 серия АА03).

Издается при содействии **Международного союза машиностроителей**

**РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:** Михайлов А.Н. (гл. редактор), Гусев В.В. (зам. гл. редактора), Лахин А.М. (секретарь) (ДНР), Байков А.В. (ДНР), Бахадиров Г.А. (Узбекистан), Братан С.М. (Россия), Буленков Е.А. (ДНР), Бутенко В.И. (Россия), Витренко В.А. (ЛНР), Горобец И.А. (ДНР), Грубка Р.М. (ДНР), Данияров Н.А. (Казахстан), Еронько С.П. (ДНР), Ивченко Т.Г. (ДНР), Коваленко В.И. (ДНР), Мазуру С. (Молдова), Маляренко А.Д. (Беларусь), Мельникова Е.П. (ДНР), Навка И.П. (ДНР), Неделку Д. (Румыния), Поветкин В.В. (Казахстан), Прутяну О. (Румыния), Родованович М. (Сербия), Суслов А.Г. (Россия), Тока А. (Молдова), Федонин О.Н. (Россия), Хандожко А.В. (Россия), Чернышев Е.А. (ДНР), Шабаетов О.Е. (ДНР)

Адрес редакции: ДНР, 83001, г. Донецк, ул. Артема, 58, ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ, кафедра ТМ. Тел.: +38 062 301-08-40

E-mail: [tm@fimm.donntu.org](mailto:tm@fimm.donntu.org), Сайт: <http://ptsm.donntu.org>

Сборник (Е) зарегистрирован в Министерстве информации Донецкой Народной Республики. Свидетельство о регистрации СМИ от 20 апреля 2017 г., серия ААА № 000125.

Сборник включен в перечень рецензируемых изданий ВАК ДНР (приказ №744 от 24.07.2017 г.), в котором могут публиковаться результаты диссертационных работ на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук, а также в базу данных РИНЦ (Российский индекс научного цитирования) (лицензионный договор № 177-04/2013 от 12.04. 2013 г.)

**ISSN 2073-3216**

**ISSN 2518-7120 (E)**

© Авторы статей, 2021  
© ГОУВПО «ДОННТУ», 2021

**И. А. Горобец**, канд. техн. наук, проф., **Н. В. Голубов**, старший преподаватель  
ГОУВПО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ», ДНР  
E-mail: gorobets.ascon@gmail.com

## УПРАВЛЕНИЕ МАКРОГЕОМЕТРИЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ШЛИФОВАНИИ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ПРИРОДНОГО КАМНЯ

*Дано описание и пример реализации способа повышения точности шлифования изделий из природного камня. Решена задача структурного синтеза системы. Обоснован выбор структурной схемы адаптивного приспособления. Разработаны схема конструкции и 3D-модель специального адаптивного приспособления. Приведены расчёты точности приспособления и динамический анализ конструкции р приспособления. Даны рекомендации по выбору типа регулирования адаптивным устройством.*

**Ключевые слова:** гранит, деталь, форма, управление, приспособление, пьезодвигатель, точность

**I. Gorobets, N. Goloobov**

## CONTROL OF SURFACE MACROGEOMETRY AT GRINDING OF PARTS FROM NATURAL STONE

*A description and an example of the implementation of a method for increasing the accuracy of grinding products from natural stone are given. The problem of structural synthesis of the system has been solved. The choice of the structural diagram of the adaptive adaptation has been substantiated. The design and 3D-model of a special adaptive device have been developed. The calculations of the accuracy of the device and the dynamic analysis of the structure of the device are given. Recommendations are given on the choice of the type of regulation by an adaptive device.*

**Keywords:** granite, detail, form, control, fixture, piezomotor, precision

### 1. Введение

Развитие современной науки и технологий привели к появлению новых задач, от решения которых зависят направления дальнейшего развития промышленного сектора экономики. Одной из таких задач является использование неметаллических материалов в конструкциях изделий машино- и приборостроения с целью повышения точности, расширения технологических возможностей, дальнейшего использования средств производства в новых условиях, в том числе и агрессивных средах. Одним из таких неметаллических материалов является природный гранит. Важной характеристикой гранита является практически полное отсутствие у него теплового расширения. Гранит обладает уникальными природными качествами: высокой твёрдостью, термостойкостью, стойкостью к внешним воздействиям, сохранением своих свойств при различных физических и химических воздействиях, в том числе, резком перепаде температур. Благодаря этим качествам, изделия из гранита могут быть использованы в качестве станин, направляющих прецизионных станков для обработки высокоточных поверхностей деталей, валков бумагоделательных машин, станин контрольно-измерительных приборов, ванн для металлургического и химического производств.

Технологический процесс изготовления изделия из природного камня включает порезку добытого из карьера монолита природного камня на мерные плиты и дальнейшую обработку заготовки до необходимого условия качества (точности, шероховатости, трещиноватости, макронеровности и пр.). Такая обработка является преимущественно, механической и заключается в многократном и многоуровневом шлифовании и полировании поверхности заготовки. При этом, значительные затраты времени (40-60%) механической обработки заготовки приходится именно на выполнение шлифо-

© Горобец И. А., Голубов Н. В.; 2021.



вальных работ [1,2]. Поскольку отклонения формы при резке камня могут достигать 3-5 мм [1,2], то шлифовальные работы включают в себя ряд операций: предварительную, черновую, получистовую, чистовую и финишную (лощение). Каждая из таких операций включает многократные проходы абразивного инструмента.

Поскольку заготовка из природного гранита обладает значительной твёрдостью, то в качестве абразивного материала шлифовального инструмента часто используют искусственные алмазные зерна. Применение алмазных шлифовальных головок позволяет значительно повысить производительность процесса механической обработки заготовок из гранита. Алмазные шлифовальные круги для торцевого шлифования имеют специфическую конструкцию, включающую бруски с алмазными зёрнами, рис.1, основание, на котором крепятся абразивные бруски и элементы крепления шлифовального круга к шлифовальной головке.



Рисунок 1. Варианты конструкций торцевых алмазных шлифовальных кругов.

Одним из специфических условий шлифования природного камня является подвижное соединение шлифовальной головки со шпинделем технологического оборудования, рис. 2-4, которое позволяет реализовать максимальную площадь контакта абразивного инструмента с обрабатываемой поверхностью заготовки.

Однако, как показали результаты наших экспериментальных исследований [3-5], каждая последующая обработка изделия из гранита наследовала макронеровности поверхности заготовки до её обработки, рис. 5, 6. Таким образом, при обработке гранитной заготовки шлифованием происходит копирование топографии поверхности заготовки.



Рисунок 2. Вид маятниковой шлифовальной головки



Рисунок 3. Вид основания шлифовального круга



Рисунок 4. Конструкция шарнирных опор шлифовальных головок

При этом, параметр высоты произвольной точки обрабатываемой поверхности заготовки можно описать выражением:

$$A_i = A_{i-1} \cdot k_i, \tag{1}$$

где  $A_i$ ,  $A_{i-1}$  - высота макронеровностей до и после шлифования;  $k_i$  – коэффициент уточнения.

$$k_i = \frac{\int \int_{b l} f(x, y) dx dy}{b l}, \quad (2)$$

где  $f(x, y)$  - функция высоты профиля вдоль и поперёк поверхности заготовки.

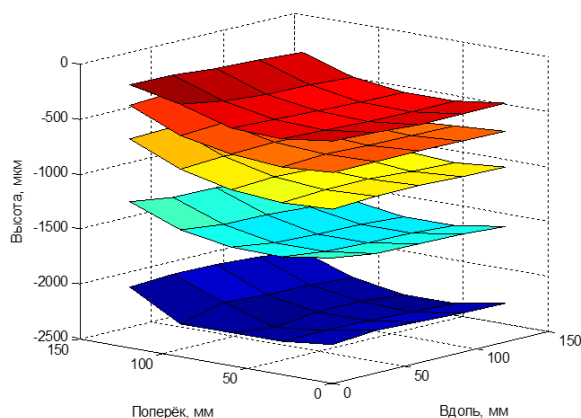


Рисунок 5. 3D - поверхность съёма слоя материала при шлифовании заготовки из гранита при подаче  $S=400$  мм/мин

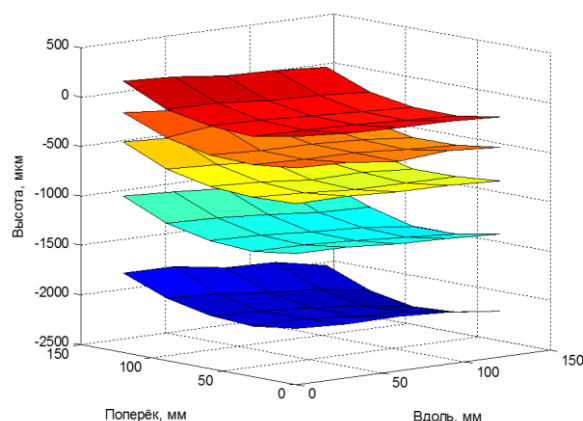


Рисунок 6. 3D - поверхность съёма слоя материала при шлифовании заготовки из гранита при подаче  $S=800$  мм/мин

Следовательно, в связи с перечисленными особенностями: процесса шлифования заготовки из камня; схем конструкций шлифовальных головок; условий закрепления шлифовальных головок к шпинделю технологического оборудования, актуальным является вопрос повышения точности обработки за счёт снижения объёмных макронеровностей обрабатываемой поверхности изделия из гранита.

**Целью исследований** является разработка принципов и синтез основ конструкции специального адаптивного приспособления, позволяющих повысить качество изготовления изделий из природного камня путём управления макрогеометрическими параметрами поверхности заготовки при её обработке.

## 2. Основное содержание и результаты

Способы повышения качества обрабатываемой поверхности заготовки исследованы в работе [6]. Одним из способов повышения шлифования природного камня является управление мгновенным положением заготовки при её обработке. Такой менеджмент 3D-положения заготовки позволит изменять условия контакта шлифовального круга и топографических неровностей поверхности изделия, что приведёт к управлению изменениями макронеровностей поверхности обрабатываемой заготовки.

Поскольку изменение положения шлифовального круга реализовать конструктивно затруднительно, то целесообразно изменять мгновенное положение заготовки по отношению к обрабатываемому инструменту. Это может быть реализовано при помощи специального приспособления.

Разработаем структурную схему такого приспособления. Предположим, что конструкция такого приспособления должна состоять из двух систем: установки обрабатываемой заготовки и микроперемещений подвижной плиты, совместно с заготовкой, позволяющих реализовать 3 движения микроперемещений: вертикального поступательного и двух поворотных, см. рис. 7.

Простейшая система микроперемещений обрабатываемой заготовки для реализации описанных движений, должна состоять из неподвижного основания, подвижных звеньев и подвижной плиты. Однако, для определения количества подвижных звеньев, их пространственного расположения между неподвижным основанием и подвижной плитой, без избыточных связей и лишних подвижностей при минимальном количестве подвижных звеньев, необходимо решить задачу структурного синтеза конструкции специального приспособления.

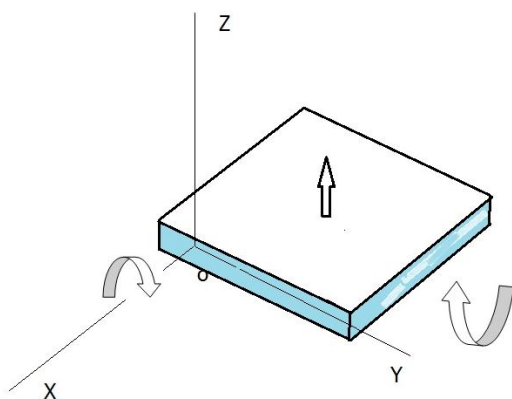


Рисунок 7. Схема возможных перемещений верхней плиты устройства

В качестве критерия эффективности соотношения длин звеньев использовался критерий минимизации суммарной работы  $A(l)$ , которая выполняется при обработке технологических траекторий [7]

$$A(l) = \sum_{j=1}^n \left( \int_0^l |P_j(l)| dt \right) \rightarrow \min, \tag{3}$$

где  $P$  – мощность привода,  $l$  - перемещение.

Задачу структурного синтеза можно сформулировать в виде системы уравнений [7]

$$\begin{cases} W = 6n - 5p_5 - 4p_4 - 3p_3, \\ \Sigma p_i = p_5 + p_4 + p_3, \\ k = \Sigma p_i - n, \\ f_{\Sigma} = p_5 + 2p_4 + 3p_3, \end{cases} \tag{4}$$

где  $W$  – степень свободы пространственного механизма,  $n$  – число подвижных звеньев;  $p_i$  – число кинематических пар  $i$ -го класса;  $k$  – число независимых контуров Гохмана;  $f_{\Sigma}$  – сумма подвижностей кинематических пар в механизме.

Таким образом, с учётом перечисленных критериев, целесообразно в качестве структурной схемы использовать схему с четырьмя звеньями V порядка (с одной степенью подвижности) 3 и 4 неподвижного основания и подвижной верхней плиты 2, рис. 8.

Степень свободы пространственного механизма определим по формуле Сомова-Мальшева [8]:

$$W = 6n - 5p_5 - 4p_4 - 3p_3 - 2p_2 - p_1 \tag{5}$$

где  $P_5 - P_1$  – кинематические пары, соответственно, V, IV, III, II и I порядка. Поскольку  $P_5 = 4, P_4 = 0, P_3 = 0, P_2 = 0, P_1 = 0$ , то

$$W = 6 \cdot 4 - 5 \cdot 4 = 4$$

Таким образом, схема конструкции специального приспособления должно состоять из основания 1, рис. 9, на котором установлены привода микроперемещений 2,

соединённые с подвижно плитой 3. На плите 3 закреплена обрабатываемая заготовка 4, взаимодействующая с абразивным инструментом 5.

Для разработанной структуры адаптивного приспособления, необходимой для реализации высокودинамичного технологического процесса обработки заготовки из камня шлифованием, в качестве движителей микроперемещений выбраны пьезодвижители.

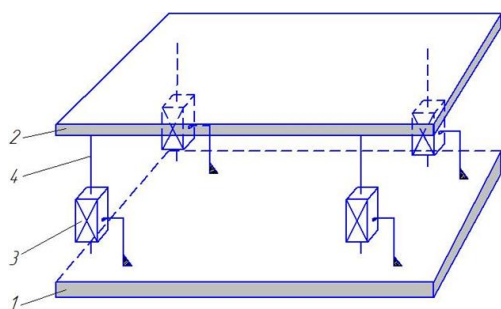


Рисунок 8. Структурная схема специального приспособления

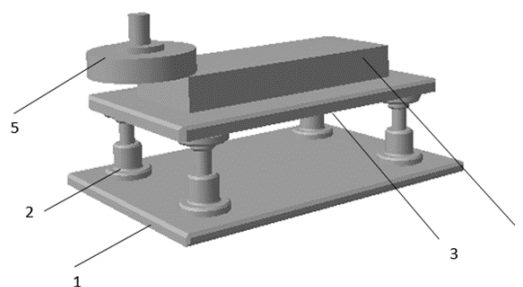


Рисунок 9. Схема конструкции адаптивного приспособления

Система установки обрабатываемой заготовки в приспособлении основана на выбранной схеме базирования и закрепления изделия. Поскольку изделия производства имеют призматическую форму, и обрабатывается только верхняя плоскость заготовки, то крепление объекта для обработки его верхней поверхности возможно лишь по боковым поверхностям или нижней части. Воспользовавшись принятой схемой базирования заготовки, путём лишения её 6-ти степеней свободы, особенностями формы и материала заготовки, в качестве схемы закрепления предполагается использование системы с движущимся рычагом, одна часть которого воздействует на заготовку, а вторая – соединена с движителем поступательного движения.

На основании разработанной структурной схемы адаптивного приспособления, рис. 8, принятых схем базирования и закрепления заготовки, разработана конструкция специальной технологической оснастки и её 3D-модель. Приспособление, рис. 10, состоит из основания 1, на котором установлены движители микроперемещений 4, соединённые с плитой 2. Плита 2 предназначена для установки обрабатываемой заготовки.

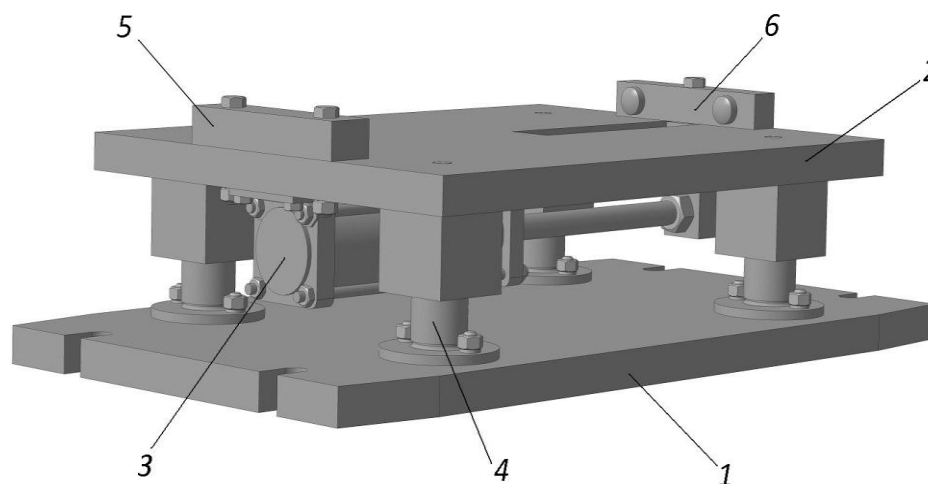


Рисунок 10. 3D - модель специального адаптивного приспособления:

На нижней части плиты 2 установлен пневмоцилиндр 3, шток которого соединён с зажимным элементом 6. Зажимной элемент 6 перемещается по пазу в плите 2. Для базирования и закрепления заготовки на верхней грани плиты 2 размещена опора 5. Приспособление крепится к столу станка при помощи станочных болтов, для которых в основании 1 выполнены пазы. Для управления вертикальным положением пьезодвигателей 4 необходимо использовать управляющий сигнал, системы адаптивного управления [9,10].

Приспособление работает следующим образом. На плиту 2 устанавливается заготовка в нужном положении, с упором в опору 5. После этого подаётся сжатый воздух в штоковую полость пневмоцилиндра 3. Зажимной элемент 6, прикрепленный к штоку пневмоцилиндра, перемещается и закрепляет заготовку. После закрепления заготовки реализуется процесс её шлифования. После момента касания инструмента с поверхностью заготовки, информация с датчика, фиксирующего осевую силу, поступает в систему управления. При увеличении осевой силы шлифования управляющий сигнал подаётся на пьезодвигатели. Они приподымают стол и заготовку на величину, соответствующую приросту осевой силы.

Поскольку точность изготовления изделия коррелируется с точностью приспособления, то в процессе проводимых исследований появилась необходимость в определении величины деформации подвижной плиты технологической оснастки под воздействием вертикальной (осевой) составляющей усилия шлифования. Расчёт деформаций приспособления был проведен в программной среде «ANSYS» [11]. Для проведения расчётов трёхмерная модель верхней плиты разработанного приспособления подвергалась разбиению на конечные элементы, после чего были заданы исходными данными. Результаты моделирования деформаций верхней плиты приспособления представлены на рис. 11.

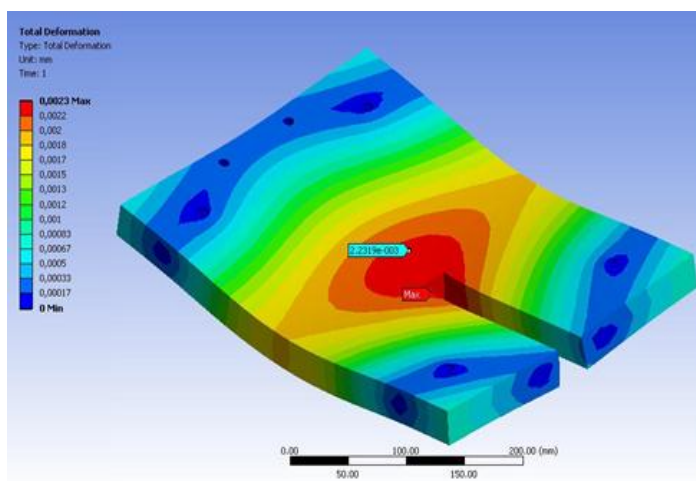


Рисунок 11. Результаты моделирования деформации подвижной плиты приспособления под действием вертикальной составляющей силы шлифования

SET	TIME/FREQ	LOAD STEP	SUBSTEP
1	1206.2	1	1
2	1595.5	1	2
3	2042.7	1	3
4	2638.1	1	4
5	2642.0	1	5
6	3178.6	1	6
7	3388.9	1	7
8	3531.4	1	8
9	3781.0	1	9
10	4748.6	1	10
11	4797.2	1	11
12	5058.9	1	12

Рисунок 12. Состав собственных частот разработанной конструкции адаптивного приспособления

Из анализа результатов моделирования деформаций верхней плиты приспособления под действием вертикальной силы шлифования в 2000 Н будет иметь максимальный прогиб, равный 0,0023мм, в центре плиты. Такая величина деформации верхней плиты приспособления является предельной ошибкой в форме впадины, величиной



в 2,3 мкм, что является допустимым для осуществления процесса шлифования заготовки из камня.

Исследование динамических характеристик разработанной конструкции приспособления путём расчётов в программной среде «ANSYS» выявило 12 гармоник собственных частот колебаний с первой гармоникой на частоте, равной 1206,2 Гц, рис. 12. Из проведённого анализа динамической нагруженности конструкции приспособления можно сделать вывод о рекомендуемом рабочем диапазоне колебаний внешней нагрузки, который может находиться в пределах 0 – 1000 Гц.

Поскольку разработанная конструкция специального приспособления должна обладать адаптивными характеристиками и реагировать на мгновенные изменения внешних факторов, то такая технологическая оснастка должна иметь соответствующее автоматическое управление. При выборе метода автоматического управления работой разработанной конструкции адаптивного приспособления воспользуемся особенностями и характеристикой процесса обработки заготовки из камня:

- Стохастический характер процесса шлифования;
- Отсутствие адекватной математической модели процесса обработки изделия;
- Нелинейная зависимость регулируемой величины от переменного параметра припуска шлифования заготовки.

Тогда, зная характеристики процесса обработки изделия шлифованием, тип регулирования объектом производства можно выбрать по данным рис. 13.



Рисунок 13. Основные методы регулирования

### Заключение.

Дано описание и принцип реализации способа повышения точности шлифования изделий из природного камня. Решена задача структурного синтеза системы, обоснован выбор структурной схемы адаптивного приспособления, рассчитана степень свободы подвижной плиты устройства. Разработаны схема конструкции и 3D-модель специального адаптивного приспособления. Проведены расчёты точности приспособления, дан динамический анализ конструкции устройств и обоснован рабочий интервал частот ди-

намических нагрузок при обработке гранитного изделия на разработанном приспособлении. Приведены рекомендации по выбору метода регулирования разработанным адаптивным устройством. Разработка может использоваться для повышения точности и производительности обработки изделий из природного камня.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Добыча и обработка природного камня: Справочник / Под общ. Ред. А. Г. Смирнова – М.: Недра, 1990 – 445с.
2. Карюк, Г. Г. Обработка камня инструментом из синтетических алмазов / Г. Г. Карюк, Б. Л. Оситинский – Киев: УкрНИИТИ, 1968 – 23с.
3. Горобец, И. А. Особенности экспериментальных исследований сил шлифования природного камня / И. А. Горобец, А. Н. Михайлов, Н. В. Голубов // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научных трудов. – Донецк: ДонНТУ, 2004. – Вып. 28. – С. 36-46.
4. Горобец, И. А. Управление качеством поверхностного слоя обрабатываемой заготовки / И. А. Горобец, А. Н. Михайлов // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Машинобудування і машинознавство. – Вип. 71. – Донецьк: ДонНТУ, 2004. – С. 164-174.
5. Горобец, И. А. Повышение качества шлифования заготовок из природного камня / И. А. Горобец, Н. В. Голубов, И. А. Чвала // «Научный Вестник Донбасской государственной машиностроительной академии». – Краматорск: ДГМА, 2011. – № 1 (6Е). – С. 29-37.
6. Горобец, И. А. Повышение эффективности обработки заготовок из камня / И. А. Горобец, А. Н. Михайлов // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научных трудов. – Донецк: ДонНТУ, 2003. – Вып. 24. – С. 36-40.
7. Несмиянов, И. А. Структурный и параметрический синтез и оптимизация программных движений манипуляторов на основе трипода: дис. ... д-ра техн. наук / И. А. Несмиянов. – Волгоград: ВГАУ, 2017. – 349 с.
8. Артоболевский, И. И. Теория механизмов и машин: учебник для вузов. – 4 изд., перераб. и доп. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988. – 640 с.
9. Горобец, И. А. Параметры регулирования адаптронных систем токарных станков / И. А. Горобец, К. Шабан // Материалы Третьего Международного научно-практического семинара “Практика и перспективы развития институционального партнёрства”; в 2-х кн. – Таганрог: ТРТУ, 2002. – №2. – С.47-52.
10. Gorobez, I. Adaptronsystem in der Werkzeugmaschine für die spanabhebende Formung / I Gorobez, N.Golubov // Entwicklungsmethoden und Entwicklungsprozesse im Maschinenbau. 5 Magdeburger Maschinenbau-Tage. – Berlin: Logos-Verl., 2001. – S.45-51.
11. Басов, К. А. ANSYS в примерах и задачах / Под общей ред. Д. Г. Красовского. – М.: КомпьютерПресс, 2002. – 224с., ил.
12. Гладчук, Е. А. Параметрическое моделирование технической системы нестабильной структуры / Е. А. Гладчук // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. Международный сборник научных трудов. – Донецк: ДонНТУ, 2016. – № 3(54) – С.25-29.

Поступила в редколлегию 30.03.2021 г.

УДК 621.9

**Н. С. Григорьева**, д-р техн. наук, проф., **В. А. Шабайкович**, д-р техн. наук, проф.  
Луцкий национальный технический университет, Украина  
Тел./Факс: +38 (063) 7141115; E-mail: [vik\\_shabajkin@ukr.net](mailto:vik_shabajkin@ukr.net)

## ЛОГИСТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА ПРОДУКЦИИ МАШИНОСТРОЕНИЯ

*Применение логистики является новым эффективным управлением качеством, которое характеризуется системным рассмотрением вопросов, ориентируется не на фрагменты или функциональные элементы, а на единое целое. Дополнительный эффект применения логического управления получается за счет системного подхода, логистического анализа ситуации, минимизации затрат на качество при целостном рассмотрении ситуации. Логистическое формирование показателей качества продукции предусматривает осуществление процесса с помощью функций логистики, которое выполняется в логистических потоках системы. Логистическими потоками считаются материальные, информационные, энергетические, человеческие, финансовые, которые взаимосвязанные и взаимодействующие между собой. Функциями логистического управления является тактика логистики, организация, планирование, управление, вычисление, контролин, передача, обслуживание, сервис.*

**Ключевые слова:** логистика, качество, управление, потоки, функции, обслуживание, сервис

**N. S. Grigorieva, V. A. Shabaykovich**

### LOGISTIC PRODUCT QUALITY ASSURANCE

*Systematic consideration of issues, focuses not on fragments or functional elements, but on a single whole. An additional effect of the use of logical control is obtained through a systematic approach, logistic analysis of the situation, minimization of quality costs while considering the situation in a holistic manner. Logistic formation of product quality indicators provides for the implementation of the process using logistics functions, which is executed in the logistics flows of the system. Logistic flows are considered material, informational, energy, human, financial, which are interconnected and interacting with each other. The functions of logistics management are logistics tactics, organization, planning, management, calculation, control, transfer, maintenance, service.*

**Keywords:** logistics, quality, management, flows, functions, service, service

**1. Введение.** Логистическое формирование показателей качества продукции предусматривает осуществление процесса с помощью функций логистики, который выполняется в логистических потоках системы. Логистическими потоками считаются материальные, информационные, энергетические, человеческие, финансовые и другие, которые взаимосвязанные и взаимодействующие между собой. Функциями логистического управления является тактика логистики, организация, планирование, управление, вычисление, контролин, передача, обслуживание, сервис.

*Цель статьи:* улучшение качества продукции машиностроения за счет логического формирования показателей качества в производственных потоках.

**2. Основное содержание работы.** Применение логистического подхода является эффективной новой концепцией управления [1], которая характеризуется системным рассмотрением, при котором ориентируются не на фрагменты или функциональные элементы отдельно, а на единое целое. Отсутствует заданное установление взаимосвязей. Возможный инструмент решения может быть системно установленным через соотношение связей, а также зависимостей при определении оптимальных показателей качества продукции в заложенных условиях с наименьшими сопутствующими затратами. При решении учитываются все логистические функции, а не отдельные зависимости, как при традиционном управлении. Поэтому концепция логистики при определении



показателей продукции должна охватывать значительную часть производственной сферы, но при сохранении иерархической функциональной дифференциации, в результате которой и строится структура логистической системы. Возможности получения конкурентных преимуществ, благодаря логистике, заключаются в индивидуальном обслуживании, связях с клиентом, стратегии канала дистрибуции, интеграции производства, углублении специализации, изменении приоритетов, формировании потенциала, которые не дают возможность получить дополнительную прибыль сейчас и особенно в будущем.

Основной целью логистики управления формированием показателей качества заключается в организации и обеспечении в соответствии с заказами уровня качества продукции при одновременном уменьшении затрат. Это порождает отдельные функциональные цели, например, планирование и управление формированием показателей качества, производственное их обеспечение, интеграцию внешних процессов и средств, требующуюся квалификацию рабочей силы и персонала и т.д. Реализация логистических целей обеспечивает система логистических функций типа планирования, обеспечения, управления процессами формирования показателей качества продукции. Перспективным является интеллектуальное управление процессами формирования качества при изготовлении изделий. Указанная методология имеет более широкое назначение, например, в организационных процессах. При этом главной задачей менеджеров является не только понимание необходимых изменений, а их эффективное непосредственное проведение на всех этапах и уровнях производства.

Главные преимущества использования логистики качества производимой продукции заключаются в том, что:

- логистика является концепцией управления формированием показателей качества продукции и информационной обусловленности с использованием системного подхода;
- существующие информационные и материальные потоки структурируются на уровне любого элемента;
- концепция логистики базируется на функциональных и структурных взаимосвязях в материальных потоках деталей, изделий, оборудования и оснастки;
- создание интегрированных организационных и информационных систем, которые реализуют поставленную цель, проводится за счет интеграции реальных компонентов;
- эффективность решений рассматривается с применением инновационного подхода, полученного при комплексном анализе и формировании уровня и структуры затрат;
- логистика является источником формирования новых потенциалов, обеспечивая постоянную эффективность;
- логистика ориентируется на требования и прогнозы рынка;
- логистика представляет потенциал и инструмент маркетинга;
- интегрированные логистические системы адаптированы к возможным изменениям;
- логистика ориентирована на широкое использование синергетических эффектов<sup>1</sup>.

Логистическая система качества продукции ориентирована на системный подход, высокое качество при меньших затратах, эффективность, за счет чего и формируется дополнительный эффект по сравнению с не логистическим подходом. На систему распространяются принципы больших систем: система является эффективной, когда состоит из меньшего количества подсистем, которые komponуются из минимального

---

<sup>1</sup> **Синергетический эффект** (от греч. *συνεργός* — вместе действующий) — возрастание эффективности деятельности в результате [интеграции](#), слияния отдельных частей в единую систему за счет [системного эффекта](#) (*эмерджентности*).

числа частей и элементов. Эффект системы будет большим от эффекта составляющих частей или элементов за счет взаимосвязей и взаимодействия между ними.

Принципами концепции логистики являются: планирование, организация и контроль, структуризация, различные взаимосвязи, синергетические эффекты, интеграция компонентов, реалии рынка, инструменты маркетинга, динамичность, приспособляе-

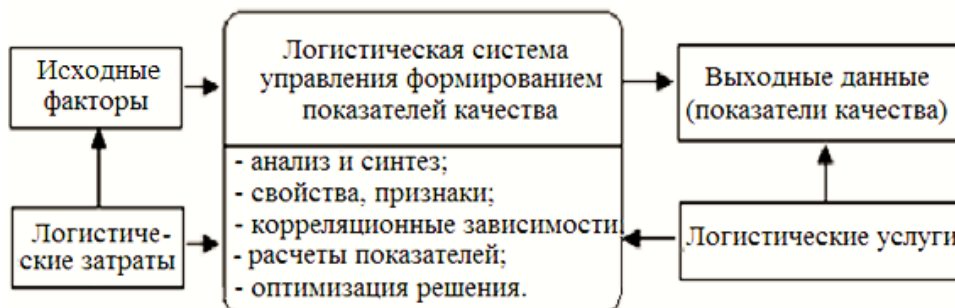


Рисунок 1. Характеристика концепции логического управления формированием показателей качества продукции.

мость, координация функций, мышление категориями общих расходов и обслуживания. Характеристика концепции логистического управления качеством приведена на рис. 1. На вход системы логистического управления формирования показателей качества подаются данные об объекте (структура, специфика, требования и т.д.), программа выпуска, используемая материально-техническая база, ожидаемое качество продукции при допустимых затратах. Логистическая система решает основные вопросы управления качеством продукции в комплексной зависимости с возможным многократным возвращением на предыдущие задачи и оптимизацией решения. Здесь возможны многочисленные логистические конфликты затрат, требующие их минимизации при нахождении оптимального решения. Выходом системы является логистическое обслу-

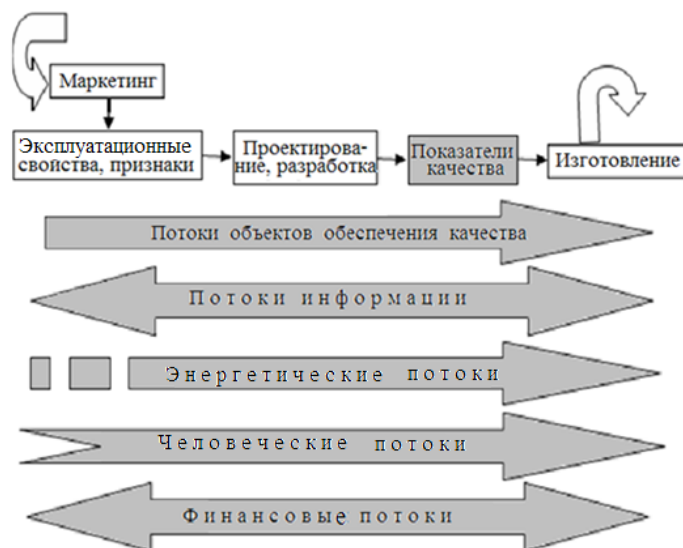


Рисунок 2. Схема интегрированного логистического управления качеством продукции.

живание в виде показателей качества и затрат на их обеспечение в соответствующем состоянии, месте и времени. Как видно, отношение выхода к входу логистической си-

стемы, т.е. логистических услуг к логистическим затратам характеризует ее производительность.

Логистические процессы необходимо рассматривать связанными с изменением показателей качества, свойств и признаков объектов качества при различных материальных, информационных, человеческих, энергетических и финансовых потоков. На рис. 2 приведены основные логистические потоки системы качества продукции. Как видно, основным потоком является информационный, который охватывает разнородную информацию, необходимую для установления оптимальных показателей качества продукции с учетом остальных потоков. Это информация о прототипах, материалах, комплектующих изделиях, методах проектирования конструкции или разработки технологии, услугах, производстве, эксплуатации и т.д. [2]. Информация должна быть формализованной, пригодной для обработки на компьютерах и находиться в базе данных. Неполный информационный поток приводит к несовершенным или даже ошибочным решениям. Особенно опасна неправильная информация.

Энергетические потоки - это электрическая энергия, топливо, сжатый воздух, другие виды энергии, используемые в системе управления качеством продукции. В условиях повышения цен на энергию правильно сформированные энергетические потоки имеют большое значение при уменьшении затрат на качество.

Человеческие потоки - это поток работников, принимающих участие в обеспечении и повышении показателей качества продукции. Их удобнее классифицировать по специальностям, уровню профессионализма, делением на основных и вспомогательных работников и т. д. В этом потоке значение имеет оптимальность и квалификация, осознание важности вопросов качества, активное участие в их решении.

Финансовые потоки отражают затраты на обеспечение качества продукции. Потоки включают расходы, связанные с эксплуатацией оборудования и оснастки, производственных и непроизводственных помещений, заработной платой, инвестициями и инновациями, и т.п., а также величиной полученного технико-экономического эффекта. Очевидно что, как и предыдущие потоки, финансовые потоки взаимосвязаны с другими потоками. Ни один поток не может рассматриваться самостоятельно и отдельно. Цепочка стоимости начинается с расходов на маркетинг, поставку материалов, полуфабрикатов, комплектующих частей, изготовление заготовок, деталей, узлов, изделий, упаковку и складирование, продажу, сервисного обслуживания, т.е. начинается от поставщиков, дальше производителей, продавцов и заканчивается потребителями. Подобная цепочка стоимости и в услугах, в состав которой входит еще и маржа.

К логистическим процессам, в общем, относится маркетинг, поставка, складирование, транспортирование, изготовление, упаковка и т. д., а в систему управления формирования качества продукции - маркетинг качества, проектирование изделия или разработка процесса, услуги, формирование показателей качества, формирование документации и т.д. Логистический процесс выступает как трансфер показателей качества и является частью процесса управления производством, подлежащий интегрированному рассмотрению, что подтверждается их органическим синтезом в логистических системах и цепочках.

В логистических процессах управления формированием качества в зависимости от характера объекта, могут использоваться различные структуры, обеспечивающие высокие показатели качества. Инфраструктура логистических процессов классифицируется по особенностям логистических задач, характеру выполняемых действий, группой элементов, их созданию и т.д. Таких классификационных критериев может быть много, но задача состоит в установлении главных. При системном подходе установле-

ны следующие основные этапы: идентификация системы, ее формирование и внедрение.

На первом этапе с классификации систем выбирается нужная схема и устанавливается ее иерархическая структура, проводится анализ и синтез ее элементов, определение окружения и формирование целей. Задачей систем логистического управления формированием качества изделий является установление нужного оптимального уровня показателей качества при минимальных затратах на них. В иерархическую структуру, которая будет обслуживать логистические потоки и процессы, входят блоки ввода начальных входных данных, анализа и синтеза свойств и признаков изделия, определение корреляционных связей между свойствами, признаками и показателями качества, формирование показателей качества, сопутствующих затрат, оптимизация показателей, окончательное установление таких показателей и затрат, связанных с ними, выдача информации. При анализе выбранных прототипов устанавливается обоснованность, оптимальность, возможное совмещение функций.

Система логистического управления формированием качества продукции работает совместно с системами конструирования изделий и разработки технологических процессов их изготовления, а также другими производственными и эксплуатационными системами, в которые вносятся необходимые корректирующие изменения. Их цели формируются в соответствии с поставленными задачами. Формирование систем логистического управления качеством проводится на базе иерархической структуризации, анализа и синтеза ее элементов.

Разработка и внедрение в производство системы логистического управления формированием качества продукции связано с использованием менеджмента расчетов, главной задачей которого можно считать текущий контроль принятия логистических решений, их интеграции в производственной системе управления, координацию сроков и затрат, что способствует процессу реализации. Неопределенность, случайность и риск должны быть устранены в работе системы [3].

Концепция логистического управления качеством продукции развивалась постепенно от минимизации уровня запасов к интеграции компьютерного обеспечения логистических и производственных процессов. Этапами развития логистического управления были фрагментарный и интегральный уровни предприятия, поставок и логистического управления предприятием. Подходами к логистическому управлению является повышение обслуживания за счет реагирования на спрос, общее интегрированное планирование участников логистической цепочки и интегрированное управление пространственно-временными перемещениями объектов управления. При этом, главной целью является удовлетворение требований потребителей, ориентиром на спрос, конкурентное преимущество, контроль качества. При заказе предполагается совместная ответственность, доступность информации, соблюдение финансово-временных факторов. Для этого предусматривается единая логистическая база, скоординированное управление, скоростное перемещение информации, прогнозирование, планирование логистики, своевременное выполнение логистических операций. Проблемами логистического управления можно считать частичные и единичные цели, использование существующего потенциала эффектов и стоимости, эластичность, создание концепций и идей, учет внешней информации, поиск новых сфер задач, принципиальные изменения. В зависимости от типа предприятия логистические системы будут иметь свои характерные черты. Так, в случае усложнения продукции будет увеличиваться количество логистических звеньев и цепей. Место логистики в установлении показателей качества продукции в логистике предприятия (рис. 3) показывает ее тесную взаимосвязь с дру-

гими формами ее применения. Отмечаются тесные связи системы качества с частями комплексной системы управления производством: маркетинга (информация о качестве прототипов продукции у конкурентов), системами технической подготовки производства, проектирования конструкции изделия (закладка конструкционных показателей качества), разработки технологических процессов изготовления (технологическое обеспечение заложенных показателей качества), управления производством (сохранение показателей качества) и эксплуатации (изменение показателей качества при работе изделия). Логистическое управление формированием показателей качества продукции связано также и с другими производственными системами, непосредственно влияющих на качество продукции. Например, в системе материалов и заготовок закладывается фундамент качества и при некачественных материалах или сделанных из них заготовках, в т.ч. и плохо выполненных, ожидать хорошего качества не приходится.

Идея логистического контроллинга состоит в сравнении полученных результатов с теми, что имеется с последующим определением отклонений, их оценкой их ответственности, зависимости, полезности, что приводит к желаемому решению. Сущностью контроллинга является то, что в зависимости от применяемых подходов (компенсация отклонений, выравнивание, программное, адаптационное, антиципационное<sup>2</sup> управле-

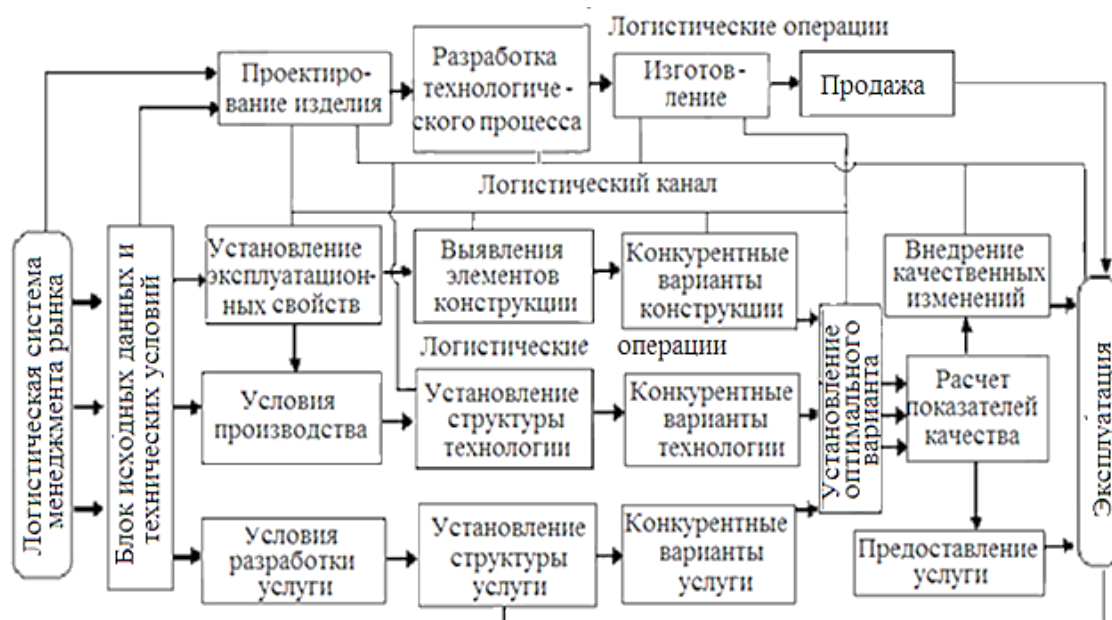


Рисунок 3. Логистическая система управления производством.

ние) используется мониторинг начального состояния и противодействие отклонениям, конфронтации отклонений, сравнение их начального и конечного состояний, удержание адаптационного процесса на данном этапе. Интеграция логистики и контроллинга способствует корректировке логистических решений.

Логистический контроллинг позволяет с помощью соответствующих инструментов, методологии, техники достичь запланированных показателей качества путем использования информации входных данных, проведения самого процесса формирования, корректировки отклонений. При логистическом управлении качеством продукции применяется стратегический и оперативный контроллинг, проводится согласование це-

<sup>2</sup> Антиципация от *лат. anticipatio* предвосхищаю - представление о результате того или иного процесса, способность системы в некоей форме предвидеть развитие событий, явлений, результатов действий.

лей, планов, корректировки решений, применяется методика и техника создания связей, событий, функций, действий. Логистика в контроллинге выполняет интегрирующие функции в управлении логистическими процессами, а также перемещениями информационных средств при контроллинговом управлении. Функции логистики и контроллинга дополняют друг друга за счет системной координации логистических процессов на уровне управления, построения оптимальных управленческих решений, структуры и содержания процессов, протекающих в системе.

В рамках организации логистического управления качеством продукции решаются такие же общие задачи в применении к формированию показателей качества т.е. выполнение необходимых функций на логистическом уровне. Сначала это организация службы маркетинга с целью изучения ситуации на рынке по качеству изделий, процессов, услуг, в первую очередь конкурентных прототипов, изготовленных на предприятии или планируемых к предстоящему выпуску. Должно быть организовано полное информационное обеспечение формирования показателей качества, а при применении автоматизации - формализация банка данных.

Существенное значение имеет методологическое обеспечение. Возникает необходимость в организации службы обнаружения, анализа и синтеза свойств и признаков объектов, являющиеся основой формирования их показателей качества. В принципе такая служба должна выполнять рекомендации, указания по отношению к уровню качества, которые будут реализованы уже службами главного конструктора и технолога. Все математическое и техническое обоснование должно выполняться в системе логистического управления качеством и может быть организовано по-разному. Лучшим вариантом является централизованная организация, хотя возможны и другие, при которых отдельные работники по управлению качеством находятся в других службах предприятия, например, в отделах снабжения, главного конструктора и технолога, механика, энергетика, производственном и т. п. Профессиональные и организационные навыки, технические инновации должны объединяться в рамках кооперации для совместного использования. При этом, координация логистических функций может распространяться и за пределы предприятия, а для их реализации использоваться внешние мощности, лицензии, информационно-логистические структуры и т.п. Целью является активное применение всех факторов для преобразования структурного и организационного потенциала получения технико-экономической эффективности. Преимуществом современных организационных форм может быть расширение границ пространства и времени, интеграция изделий, процессов, услуг, гарантия их качества, развитие инфраструктуры, «*know-how*» и партнерство, последовательная адаптация логистических процессов, квалификация работников и т. п.

Направлениями развития стратегических организационных логистических структур считается ориентация на процесс, рынок и логистический канал. В первом случае должна быть достигнута высокая эффективность интегрированной логистической системы на обеспечение дополнительного логистического эффекта в цепях стоимости. Во втором случае внимание сосредоточивается на совместной реализации поставок и продаже. Более сложный третий случай, когда организация логистики ориентирована на логистический канал, в котором эффективное управление базируется на совместных действиях участников. Организационная структура логистики использует концепции интеграции всех логистических задач в одной организационной структуре, зависимости организационной структуры от внутренних и внешних факторов и ситуаций, поэтапной концентрации логистических задач.

Реализация каждой концепции логистики и логистического управления, организации логистики должна соответствовать определенным принципам: ориентации на

время, рынок, интеграцию, перемещения. Можно рассматривать логистику в функциональной, дивизиональной и матричной структуре организации. Одной из характеристик динамики организации логистики является ее значение в иерархической системе управления предприятия. По результатам практического анализа можно сделать вывод, что практикуется формальная организация логистики, место руководителя логистики находится на высшем иерархическом уровне, организация логистики является переменной и пригодной для реорганизации, меняется ориентация на централизованный контроль логистики, логистическое управление выходит за пределы традиционных структур и стратегически концентрируется внимание на удовлетворении потребностей клиента и создание для него логистической стоимости. Это приводит к необходимости оптимизации организационного обеспечения логистики. Конкретными шагами создания организационной структуры является осознание стратегий и целей предприятия, организация логистических функций в структуре предприятия, выделение функций компетенции логистики, анализ существующего состояния управления, обеспечение эластичности деятельности, взаимосвязь с вспомогательными системами, формирование планов работы.

**3. Заключение.** К недостаткам организации логистического управления качеством продукции машиностроения можно отнести также сопротивление, которое оказывают сами работники из сущности натуры противиться всему новому, низкой их квалификации или совместной их деятельности. Проявляется сильная вера в существующую систему и недоверие к новой. При этом, следует учитывать и позицию руководства, которое борется за свое влияние и возможность управления в организации. Такая вредная деятельность отдельных руководителей должна быть своевременно распознана и устранена. С другой стороны далеко не все проблемы организации логистического управления, особенно на уровне систем, например, качества продукции, остались теоретически и практически решены. Это особенно относится к переходным этапам организации. Логистические решения, принимаются не всегда обоснованными и правильными, а главное - проверенными на практике. Но это уже направление будущих исследований.

Некоторые замечания можно сделать относительно логистического управления качеством продукции. Во-первых, это их некоторая общность, во-вторых – не учитывание всех воздействий производства и, в-третьих - частичная неприспособленность к различным видам и типам производства, острая потребность в конкретизации. Отсутствует также типовая схема логистического управления отдельными наиболее важными проблемами производства. Все это может быть источником неполноценных логистических решений, особенно при недостаточной квалификации персонала.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Джеймс Вумек, Бережливое производство / Дж. Вумек, Дэниел Джонс. – М.: Изд-во Альпина Паблишер, 2020. – 472 с.
2. Григорьева, Н. С. Малозатратное изготовление конкурентной продукции: Монография / Н.С. Григорьева, В. А. Шабайкович. – М.: Из-во: Palmarium academic publishing 2015. – 440 с.
3. Шабайкович, В. А. Управління забезпеченням якості продукції [Текст]: посіб. для студ. вищ. навч. закл. / В. А. Шабайкович. – Львів: Львів. ін.-т менеджменту, 2013. – 235 с.

Поступила в редколлегию 17.03.2021 г.



УДК 622.24.085

**О. И. Калиниченко**, д-р техн. наук, проф., **А. А. Каракозов**, канд. техн. наук, доцент,  
**А. В. Хохуля**, канд. техн. наук

Донецкий национальный технический университет, ДНР

Тел.: +38(062) 301-03-24. E-mail: [ttbs@donntu.org](mailto:ttbs@donntu.org)

## ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СХЕМЫ И ТЕХНИКИ МНОГОРЕЙСОВОГО БУРЕНИЯ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ СКВАЖИН НА МОРСКИХ АКВАТОРИЯХ

*В статье приведены результаты разработки и применения нового бурового снаряда для бурения инженерно-геологических скважин; обоснована возможность применения универсального гидродарного бурового снаряда, функционально заменяющего многочисленный перечень нормативно предусмотренных технических средств для выполнения инженерно-геологического бурения скважин на шельфе.*

**Ключевые слова:** континентальный шельф, инженерно-геологические изыскания, технология и техническая основа бурения, универсальный гидродарный буровой снаряд.

**O. I. Kalinichenko, A. A. Karakozov, A. V. Khokhulia**

## SUBSTANTIATION OF TECHNOLOGY SYSTEM AND MULTI-TRIP DRILLING TECHNIQUE USED IN ENGINEERING AND GEOLOGICAL SURVEY IN SEA AREAS

*The article refers to the results of elaboration a new drill string and its appliance for boring of engineering-geological holes; the article argues possibilities of appliance of cross-functional hydraulic-percussive drill string that substitutes multiple functions of technological tools stipulated by standards regulating engineering and geological survey in continental shelf area.*

**Keywords:** continental shelf, engineering and technological survey, operating procedure and technological basis of boring, cross-functional hydraulic-percussive drill string.

Направленность современных тенденций освоения морских месторождений характеризуется поиском и развитием технико-технологической базы бурения инженерных скважин. Такие скважины обеспечивают подготовку инженерно-геологических данных для проектирования трасс трубопроводов, якорных систем, площадок для постановки СПБУ в порту или прилегающей к нему акватории и др.

Основным критерием обоснования технических средств, для производства изысканий, является возможность достижения ими глубины бурения, на которой породы не оказывают влияние на устойчивость проектируемых сооружений. В соответствии с нормативными требованиями [1], около 25% в объеме изысканий занимают скважин глубиной от 6 до 25 м, а более 60% приходится на скважины глубиной до 50 м. В качестве технической основы проходки таких скважин применяются, как правило, специализированные буровые суда (БС), оснащенные буровыми агрегатами, реализующими вращательный способ. С точки зрения полноты получения инженерно-геологической информации, выделенные технические группы зачастую находятся в противоречии к нормативным требованиям.

Учитывая специфику осадочных накоплений, характеризующихся высокой частотой чередования по вертикальному разрезу скважины пород различной плотности, консистенции и гранулометрического состава, задача получения качественного керна, за счет применения вращательного способа проходки скважин, существенно ограничивается или становится невозможной [2, 4].

Дополнительным сдерживающим мотивом использования БС является их низкая рентабельность при выполнении больших объемов бурения глубиной 25-50 м, на от-



дельно выделенной площадке изысканий. Применение традиционной технологической схемы вращательного способа проходки скважин до отмеченных глубин предусматривает использование обсадных колонн. Это предполагает весьма жесткие требования к раскладке якорей. Для обеспечения надежной стабилизации БС над устьем скважины, особенно при течениях свыше 1 м/с, количество якорей должно быть не менее 4-х. Как следствие, существенно увеличивается трудоемкость подготовительно-заключительных и вспомогательных операций. Принимая также во внимание волнение моря (до 2-х баллов), при котором допускаются работы с БС [1], коэффициент полезного использования бурового судна не превышает 20%, а затраты времени на перебазирование судна на новую точку в несколько раз превышают продолжительность чистого бурения скважины [3]. Отмеченные противоречия, а также высокая арендная стоимость специализированных судов (15000 \$ в сутки и более), применение БС для рассматриваемой области морского бурового производства становится экономически невыгодным.

Весьма часто организации, выполняющие инженерно-геологическое бурение, сталкиваются с проблемами, возникающими вследствие низкой избирательности БС или их отсутствие в арсенале морских геологоразведочных экспедиций. В тоже время, парк флота таких предприятий располагает достаточным числом мобильных и экономичных судов общетехнического назначения (спасательные и обслуживающие суда, морские буксиры и др.). Использование отмеченной группы плавсредств является очевидным фактором снижения напряженности в рассматриваемой области морского бурового производства.

Проблема и значимость развития технологической схемы бурения скважин с неспециализированных плавсредств, определена еще в 70-х годах ХХI в. Однако завершённых практических предложений по ее воплощению в жизнь до настоящего времени нет [4].

Основная трудность осуществления схемы обусловлена необходимостью максимальной адаптации забортного способа бесколонного бурения к штатному оборудованию судов общетехнического назначения, предусматривающей исключение из традиционной комплектности бурового агрегата такого энергоемкого и габаритного оборудования как буровая вышка, буровой станок, бурильные и обсадные трубы, емкости для хранения и очистки бурового раствора и пр. Постановки возникших при этом задач, усложнялась необходимостью решения ряда принципиальных вопросов. Во-первых, учитывая глубину бурения (преимущественно до 50 м), реализация способа предполагала поиск технического обеспечения многорейсового цикла проходки скважин с поинтервальным отбором керна. Во-вторых, предусмотренная бесколонная проходка скважин требовала поиска принципиальных технических решений, предусматривающих возможность очистки ствола на глубину ранее пройденного интервала, частично или полностью замещенного породами, вследствие обрушения стенок скважины, для беспрепятственного погружения бурового снаряда с дальнейшим оперативным изменением способа бурения, на интервале отбора керна.

Обширные исследования и опыт буровых работ на морских акваториях, накопленный специалистами и учеными Донецкого национального технического университета (ДонНТУ), позволил выделить и реализовать основные направления разработок. В основу решаемых задач положена принципиально новая технологическая схема бурения, предусматривающая бесколонную поинтервальную проходку ствола скважины, предусматривающую использование в течение рейса двух способов разрушения пород на забое: • *с отбором керна*, за счет частотно-ударного погружения бурового снаряда в осадки, и • *без отбора керна* на заданном или пройденном без крепления интервале.

В технологическом плане предусмотренные способы разрушения пород на заданных участках ствола скважины обеспечиваются гидроударным буровым снарядом (ГБС), структурно объединяющим колонковый набор, гидроударник (ГУ), укомплектованный пусковыми узлами: верхним (ВПУ) и нижним (НПУ), являющимися управляющими элементами ГБС, и устанавливающими заданные режимы разрушения пород на интервалах скважины.

В начальном варианте ГБС предусматривался дискретный характер изменения способов разрушения пород на интервалах скважины: • размыв участка ствола при увеличенной подаче жидкости в гидросистему; • временное отключение насоса для срабатывания НПУ и ВПУ; • включение насоса для запуска и работы ГБС в режиме отбора керна [3].

При таком способе изменения режимов работы ГБС возникали существенные трудности, как в эксплуатационном, так и технологическом плане, прежде всего, при проходке заданного или ранее пройденного интервала *без отбора керна*. Так, при встрече трудноразмываемых пород, их разрушение дополнялся «ключущим» способом бурения, в виде периодического поднятия и сбрасывания ГБС на забой с последующим вымыванием керна из колонкового набора. Операция постоянного поднятия и сбрасывания ГБС нередко сопровождалась нарушением согласованности в креплении системы «нагнетательный шланг-грузовой трос». В ряде случаев это приводило к аварийным ситуациям [3].

Отмеченная технико-технологическая недоработка явилась основой постановки задачи, направленной на более полную реализацию потенциальных возможностей ГБС путем исключения «ключущего способа» из перечня операций в полном цикле бурения скважин.

Содержательной частью проведенных исследований, явились инженерные решения, направленные на расширение эксплуатационных возможностей ГБС и касались, прежде всего, получения нового способа разрушения пород *без отбора керна* на заданном или ранее пройденном интервале скважины. Итогом поиска реализации поставленной задачи, явилась разработка гидроударного бурового снаряда, которому присвоен индекс ГБС 127М (рис. 3). Принципиальным отличием ГБС-127М, по отношению к известным снарядам, входящих в комплект ранее созданных установок УМБ [3], является включение в его состав гидроударника (ГУ), в котором верхний пусковой узел выполнен в виде распределительного переходника 2, в расточенной части которого расположен подпружиненный полый ступенчатый поршень 3 с системой боковых окон и каналов. На фазе бескернового бурения ВПУ распределяет поток жидкости, направляя его как в рабочие камеры ГУ, так и на забой скважины, обеспечивая одновременное формирование частотно-ударных и гидромониторных нагрузок на забое [5, 6].

Для привода ГБС используется ограниченный перечень палубного оборудования (рис. 1): буровой насос для подачи жидкости в ГБС по нагнетательному шлангу, выполненному в виде отрезков, сращенных между собой специальными шланговыми соединениями (ШС) и длина которого согласована с длиной троса с помощью опорных цилиндров, приваренных к ШС; на жестком отрезке обвязки насоса последовательно установлены: регулировочный вентиль, служащий для изменения подачи жидкости в нагнетательный трубопровод при смене режима работы гидроударника на фазах отбора керна и бескерновой проходки интервалов скважины и питатель, оснащенный шаровым клапаном и являющийся элементом управления ВПУ.

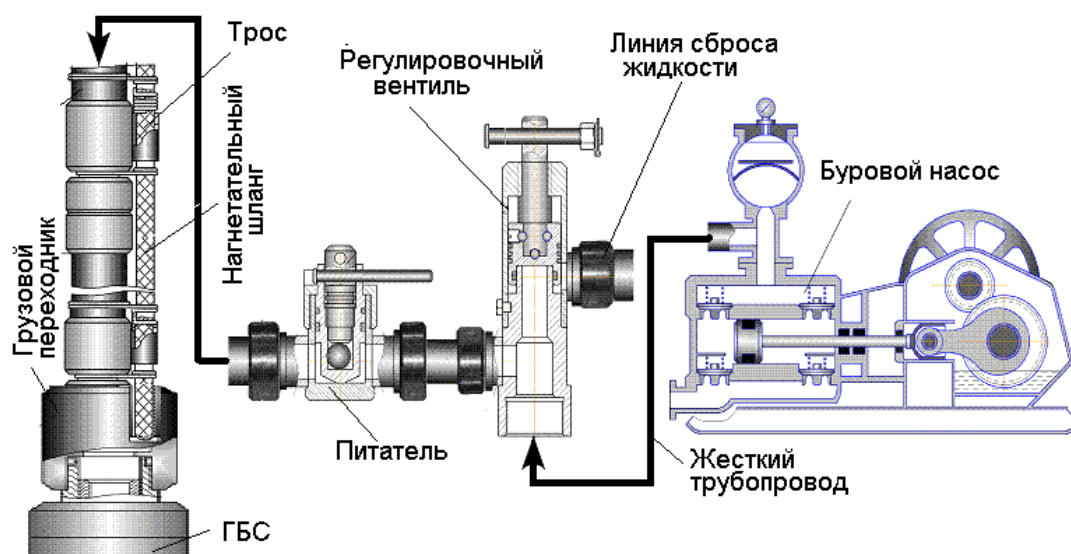


Рисунок 1. Обвязка бурового насоса на палубе.

Технологическая схема поинтервального отбора керна, с использованием предложенного ГБС, приведена на рис. 2.

Снаряд через грузовой переходник 4 соединяется с судовой грузовой системой. С помощью троса 2 ГБС спускается на точку бурения и стабилизируется на дне моря донной опорой 3.

Ранее пробуренный или заданный интервал скважины ( $L$ ) проходится без отбора керна. При этом в гидросистему (по нагнетательному шлангу 1) подается увеличенный расход жидкости -  $Q_1 = Q + \Delta Q$  (рис.2, а).

На этой фазе работа выполняется без размещения в ВПУ шарового клапана 1, а поршень 3 (см. рис.3) зафиксирован в корпусе распределительного переходника 2 срезными штифтами 18. Подача жидкости  $Q_1$  в системе каналов и окон ВПУ разделяется на две составляющие:

- Поток  $Q$ , по клапанной щели «г» и смещенному каналу «д» поступает в рабочие камеры цилиндра 8, обеспечивая запуск гидроударника (ГУ). В процессе работы ГУ боек 8 наносит удары по наковальням 9 и 11, формируя на них ударные нагрузки, передающиеся колонковому набору, включающему наружную трубу 17 с режущим башмаком и внутреннюю (керноприемную) трубу 18. Отработанная в гидроударнике жидкость в объеме  $Q$ , через обратный клапан 5 и окно «е» выходит в кольцевой зазор между кожухом 6 и корпусом 7 гидродвигателя ГУ (зазор «а», см. рис.2, а).

- Одновременно объем жидкости  $\Delta Q$ , через боковые отверстия в ступенчатом поршне 3 и радиальному каналу «м» распределительного переходника 2 в кольцевом зазоре объединяется с потоком  $Q$  (см. также рис. 2, а) и по каналам «к» нижней наковальни 11, направляется в камеру «н» НПУ. Суммарное действие потока  $Q + \Delta Q$  в камере НПУ обеспечивает смещение системы «поршень 15 + клапан 16»: клапан перекрывает доступ жидкости в кольцевой зазор колонкового набора; открываются радиальные окна «л» и весь поток  $Q_1$  направляется в керноприемную трубу 18 (см. также рис. 2, а).

Совмещение выделенных способов разрушения пород на проходимом участке  $L$ , соответствующего началу бурения скважины с отбором керна, с одной стороны, обеспечивает эффективное частотно-ударное разрушение пород по разрезу скважины, с другой – гидромониторная нагрузка препятствует формированию керна в керноприем-

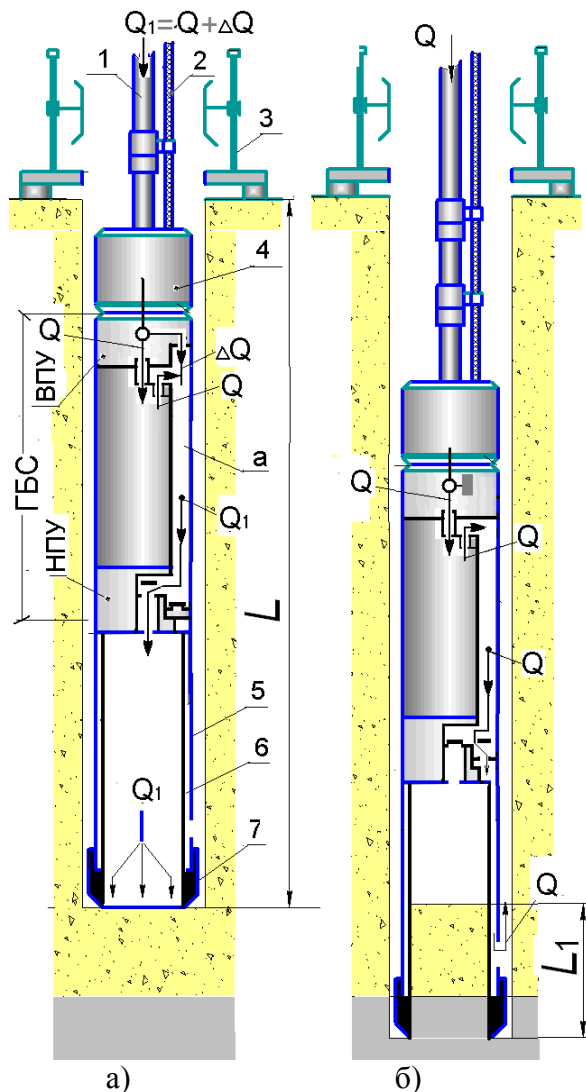


Рисунок 2. Принципиальная технологическая схема многорейсового бурения скважин: *а* – бескерновая проходка ствола скважины; *б* – бурение интервала с отбором керна; 1 – нагнетательный шланг; 2 – грузовой трос; 3 – донная опора; 4 – грузовой переходник; 5, 6 – соответственно наружная и керноприемная труба колонкового набора; 7 – породоразрушающий башмак.

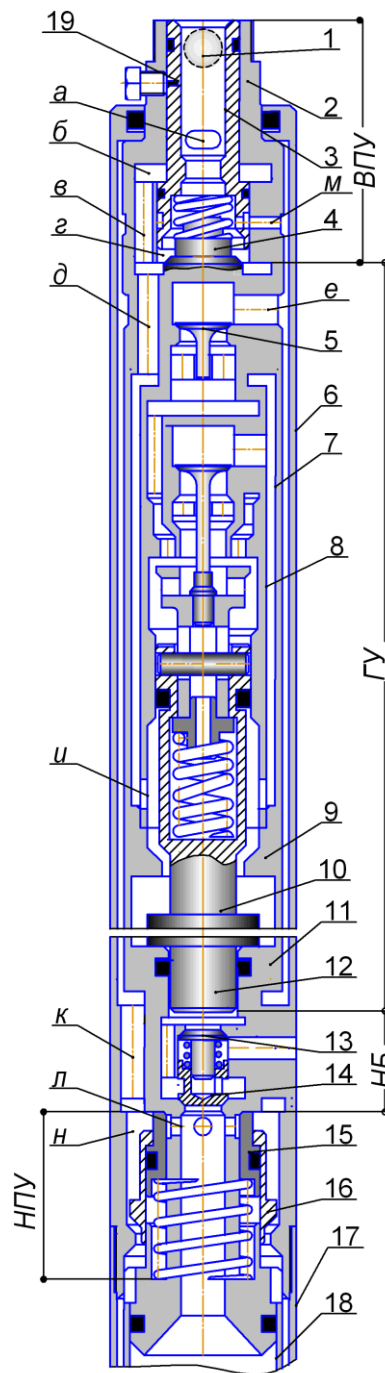


Рисунок 3. Схема ГБС 127М.

ной трубе.

Переход на способ разрушения пород с отбором керна обеспечивается при пониженной подаче жидкости, оперативно изменяемой регулировочным вентилем. В нагнетательную линию с помощью питателя сбрасывается шарик 1. При его посадке на

седло поршня ВПУ в гидросистеме повышается давление. Срезаются штифты 19. Ступенчатый поршень 3, смещаясь, садится на пробку 4, закрывая клапанную щель «г» и радиальные каналы «и». Совмещаются: окно «а» и камера «б», обеспечивая возможность прохода жидкости по каналу «д» в рабочие камеры ГУ. Одновременно, уменьшенная подача жидкости ( $Q$ ) является условием перемещения системы «поршень 15-клапан 16» НПУ вверх. Перекрываются окна «л» прерывая поступление жидкости в керноприемную трубу 18 (см. также рис. 2, б).

Изменением подачи жидкости (с помощью регулировочного вентиля), гидроударник выводится на эффективный режим работы с частотно-ударными параметрами, достаточными для погружения колонкового снаряда в пересекаемые по разрезу скважины породы.

На фазе отбора керна функции ГУ расширены приводом в действие насосного блока (НБ), обеспечивающего постоянную обратную циркуляцию жидкости в керноприемной трубе. НБ включает вытеснитель, роль которого выполняет шток 12, представляющий собой меньшую ступень дифференциального поршня бойка 8, и клапанную группу, состоящую из нагнетательного 13 и всасывающего 14 клапанов.

Для реализации предложенной технологии разработаны установки, которым присвоены индексы УМБ-2М и УМБ-130М, укомплектованные гидроударным буровым снарядом ГБС-127М, и дополненные грузовой системой и системой стабилизации ГБС на дне.

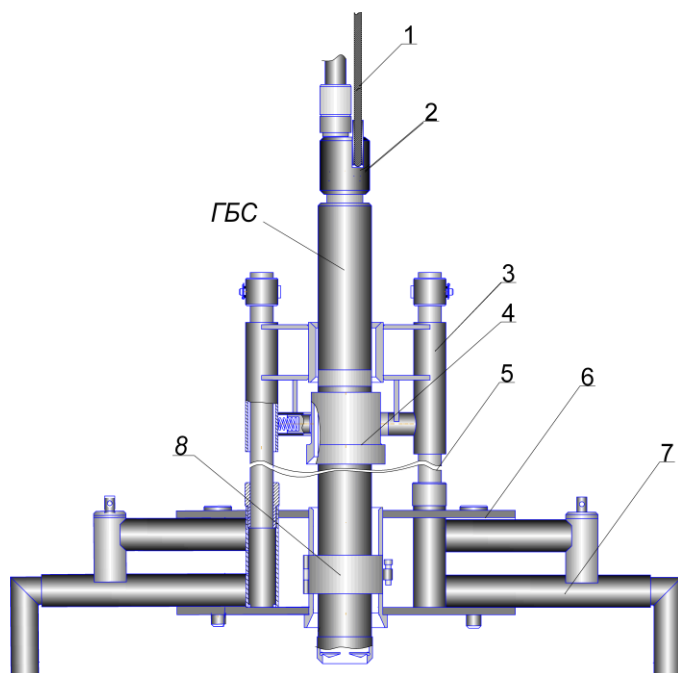
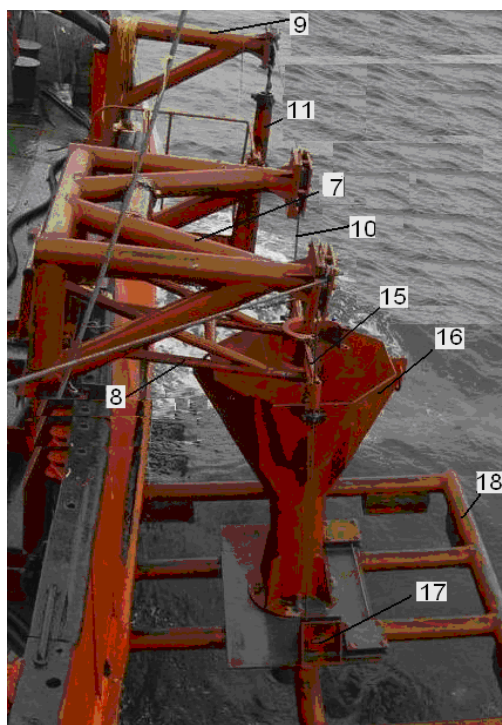
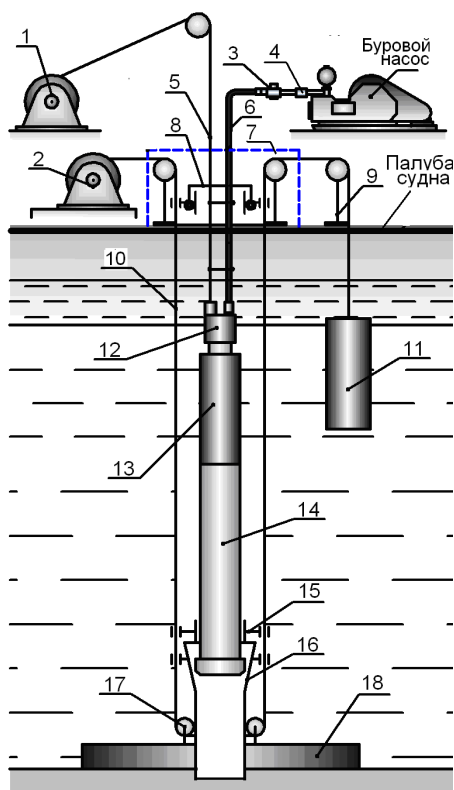


Рисунок 4. Система стабилизации ГБС установки УМБ-2М.

Установка УМБ-2М относится к классу легких технических средств и предназначена для бурения скважин глубиной до 25 м. Состав ее грузовой системы адаптирован к судовому грузовой системе, включающему буровую или судовую лебедку, с тросом 1, пропущенным через блок судовой стрелы и жестко закрепленным на грузовой переходнике 2. Система стабилизации ГБС на дне обеспечивается опорой, состоящей из утяжеленного основания в виде шести трубчатых лап 7, жестко связанных с неподвижной кареткой 6, оснащенной направляющим раструбом с хомутом 8, и двумя патрубками для установки стоек 5, по которым перемещается подвижная каретка 3 с поворотной воронкой 4.

Установка УМБ-130М предназначена для бурения скважин глубиной до 50 м. Учитывая более широкие показатели применения, принимая во внимание требование бесколлонной проходки ствола при, как правило, весьма неустойчивом характере пород в разрезе скважины, грузовой и стабилизирующей системы УМБ-130М по сравнению с УМБ-2М имеют существенные отличия (рис. 5). Система стабилизации ГБС над устьем скважины, предусматривает повторное попадание ГБС в открытый, частично обрушенный ствол скважины.

Для выполнения спуско-подъемных операций (СПО) необходимый перечень грузоподъемного оборудования установки включает: буровую планетарную лебедку 1, которая через трос 5, соединенный с грузовым переходником 12 обеспечивает спуск и подъем ГБС (гидроударник 13+колонковый набор 14), и грузовую лебедку 2 для спуска и подъема донного (стабилизирующего) основания 18.



Оборудование грузового комплекса за бортом судна.

Рисунок 5. Схема и комплектность установки УМБ 130М:

1 – планетарная буровая лебедка; 2 – грузовая лебедка; 3 – питатель; 4 – регулировочный вентиль; 5 – грузовой трос; 6 – нагнетательный шланг; 7 – грузовой опорный модуль; 8 – кронштейн; 9 – грузовая стойка; 10 – талевый канат; 11 – компенсационный груз; 12 – грузовой переходник; 13 – гидроударник; 14 – колонковый набор; 15 – элеватор; 16 – направляющая воронка; 17 – система роликов; 18 – донное основание.

Донное основание имеет направляющую воронку 16 и через систему роликов 17, талевым канатом 10 через ролики Г-образных направляющих опорных стоек модуля 7, жестко прикрепленного к фальшборту, связано с судном. На свободном конце талевого каната, пропущенного через ролик грузовой стойки 9, закрепляется груз 11, который обеспечивает постоянное натяжение направляющих ветвей талевого каната с компенсацией его длины при перемещениях судна.

В процессе СПО, ГБС центрируется относительно оси скважины элеватором 15, который свободно перемещается по направляющим ветвям талевого каната 10. В начале операции спуска элеватор располагается на выдвижном кронштейне 8. При перемещении кронштейна (втягивании в сторону палубы) происходит освобождение элеватора, который, перемещаясь по корпусу ГБС, опускается до упора в башмак или предусмотренный на колонковом наборе ГБС ограничительный уступ. При контакте с

направляющей воронкой 16 элеватор останавливается, а снаряд продолжает перемещение вниз до заданной глубины внедрения. После углубки на длину рейса ГЭС вместе с элеватором поднимается вверх. Элеватор фиксируется на кронштейне 8. Открытием элеватора ГЭС освобождается и с помощью грузовой стрелы и буровой лебедки перемещается на палубу.

Обе модификации УМБ прошли большой объем производственных испытаний. За период 2003 – 2012 г.г. установками пробурено сотни скважин глубиной от 6 до 45 м, на более чем 20 площадках газовых месторождений Черного и Азовского морей [4]. В 2006 г. установка УМБ-130М, использована в Чукотском море при геологическом съемочных работах по Программе Государственного геологического картирования шельфа России [7]. В 2009 г. по итогам бурения экспериментальных инженерно-геологических скважин в порту г. Вунг Тау, техническими и геологическими службами компании Far east marine geology engineering (DMIGE) Ltd. (Вьетнам), установка УМБ-130М прошла приемку и включена в перечень технических средств морского бурового производства.

Основные технические данные ГЭС-127М и обобщенные показатели применения установок УМБ-2М и УМБ-130М на объектах изысканий, приведены в таблице.

Таблица. – Техническая характеристика и показатели применения установок.

<i>Техническая характеристика гидроударного бурового снаряда ГЭС-127М</i>		
<i>Габаритные размеры</i>	Наружный диаметр корпуса, мм	127
	Длина гидроударника (без колонкового набора), мм	2250
	Масса гидроударника, кг	155
	Длина колонкового набора, м	2 - 6
	Диаметр керноприемной трубы/диаметр бурения, мм	98/130
<i>Параметры привода</i>	Номинальная подача жидкости на привод ГУ, л/мин	180-210
	Рабочее давление жидкости в цилиндре ГУ, МПа	2,6-3,8
	Подача жидкости на фазе бескернового бурения, л/мин	300-400
<i>Рабочие параметры</i>	Энергия единичного удара, Дж	131-195
	Частота ударов в минуту	1350-1600
	Мощность на привод гидроударника, кВт	8,0-14
	Моторесурс/ межревизионный период, маш/ч	350/8
<i>Показатели применения установок</i>		
Показатель	УМБ-2М	УМБ-130М
Диаметр бурения, мм	130	130
Диаметр керна, мм	95	95
Выход керна, %	90 ± 5	90 ± 5
Коммерческая скорость бурения; • однорейсовое (6 м) • многорейсовое (25 м) • многорейсовое (50 м)	Средняя по итогам применения	
	7,1 м/ч	6,2 м/ч
	4,1 м/ч	4,8 м/ч
	-	3,7 м/ч

Предложенные технические решения позволили:

Расширить показатели назначения выделенных типов установок за счет использования комбинированного способа разрушения пород в виде одновременно формиру-



ющихся частотно-ударных нагрузок и гидромониторного эффекта при бурении интервала ствола скважины без отбора керна. Впервые получена возможность бескерновой проходки скважин, забой которых может быть представлен как песками и глинами различной плотности и твердости, так и более тяжелыми породами (алевролиты, аргиллиты, твердые глины, гальки, прослой песчаника, известняка, и др.).

Выделенные факторы позволяют рассматривать разработанные модификации УМБ как альтернативу вращательного бурения с буровых судов (БС) специального назначения.

По сравнению с традиционной схемой проходки таких скважин агрегатами БС использование предложенных модификаций УМБ, эксплуатирующихся с борта экономических судов общетехнического назначения обеспечило более чем 3-х кратное увеличение производительности и рентабельности рассматриваемой области морского бурового производства. Кроме того, применение установок на объектах изысканий позволило значительно повысить качество отбора проб, достигнув выхода керна, более 90%, а отбор инженерно-геологических проб в рыхлых породах этот показатель вырос более чем на 30% при сохранении высокой механической скорости бурения

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Инженерные изыскания на континентальном шельфе. Пособие к ВСН 51.2-84 – Мингазпром. – Ч. 1. – Рига, 1989.
2. Владиславлев, В. С. Пути развития техники и технологии бурения на шельфе. / Владиславлев, В. С., Хворостовский С. С., Истошин С. Ю. // Технология и техника геологоразведочных работ. – М., 1980. – Вып.4. – С. 24-35.
3. Калиниченко, О. И. Гидроударные буровые снаряды и установки для бурения скважин на шельфе. / Калиниченко О. И., Зыбинский П. В., Каракозов А. А. – Донецк: «Вебер» (Донецкое отделение), 2007. – 276 с.
4. Калиниченко, О. И. Установки для бесколонного бурения скважин на морских акваториях. / Калиниченко, О. И., Хохуля А. В., Зыбинский П. В., Каракозов А. А. – Донецк: «Донбасс», 2013. – 161 с.
5. Патент на изобретение №81016 «Колонковый снаряд» /Каракозов А. А., Калиниченко О. И., Зыбинский П. В., ДОННТУ: Государственный реестр Украины на изобретения. Опубл. 26.11.2007, Бюл.№19.
6. Пат. №77466 Украина, Гидроударный буровой снаряд / Калиниченко О. И., Хохуля А. В., Каракозов А. А.; ДОННТУ: Государственный реестр патентов Украины на на полезные модели. опубл. 11.02.2013, Бюл. № 3.
7. Каракозов, А. А. Результаты опытной эксплуатации установки УМБ-130 при проведении геолого-съёмочных работ в Чукотском море. / Каракозов А. А., Калиниченко О. И., Зыбинский П. В., Хохуля А. В., Комарь П. Л., Гусев Е. А., Егоров Ю. П. // Збірник наукових праць ДонДТУ. Серія гірничо-геологічна. – Донецьк (ДонДТУ), 2007. – Вып. 6(125). – С. 53-57.

Поступила в редколлегию 12.04.2021г.



УДК 629.423.1

**О. А. Кузнецова**, канд. техн. наук, доцент  
Тульский государственный университет, Россия  
Тел.: +7 (915) 7823260; E-mail: [o.a.kuznetsova@mail.ru](mailto:o.a.kuznetsova@mail.ru)

## МОДЕЛИ ОПТИМИЗАЦИОННОГО РАСЧЕТА МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ И СИНТЕЗА ЗАКОНА УПРАВЛЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ. ДВУХМАССОВАЯ МЕХАНИЧЕСКАЯ СИСТЕМА

*Рассмотрены особенности построения модели для оптимизации и синтеза закона управления механической системой. Модель является составной частью сеточного ЛП<sub>τ</sub>-поискового метода оптимизации и синтеза закона управления механической системой, который основан на комплексном сочетании аналитической составляющей инвариантного подхода к синтезу структуры закона управления и исследования пространства варьируемых параметров большой размерности. Метод определяет стратегию синтеза системы управления исходя из физических особенностей и желаемых режимов работы механической системы, определяет математическое выражение структуры и значения вектора переменных параметров.*

**Ключевые слова:** поисковый метод, оптимизация, параметры, динамика, управление

**O. A. Kuznetsova**

## MODELS OF OPTIMIZATION CALCULATION OF MULTICRITERIAL OPTIMIZATION AND SYNTHESIS OF THE LAW OF CONTROL OF A MECHANICAL SYSTEM. TWO-MASS MECHANICAL SYSTEM

*The features of building a model for optimization and synthesis of the control law of a mechanical system are considered. The model is an integral part of the grid-search method of optimization and synthesis of the control law of a mechanical system, which is based on a complex combination of the analytical component of the invariant approach to the synthesis of the structure of the control law and the study of the space of variable parameters of large dimension. The method determines the synthesis strategy of the control system based on the physical characteristics and the desired modes of operation of the mechanical one, determines the mathematical expression of the structure and values of the vector of variable parameters of the system control law.*

**Keywords:** search method, optimization, parameters, dynamics, control

### 1. Введение

Машины и механизмы с упругими механическими связями составляют значительный класс, к которым относятся подъемные машины, лифты, механизмы подъема груза кранов и перемещения каретки с грузом, вибрационные установки (грохоты), горные машины и др. устройства. Современное развитие техники определяет оснащение производственных механизмов регулируемые электроприводами с современными преобразователями на полностью управляемых силовых ключах, формирующих безинерционный источник момента. При проектировании и эксплуатации широкого класса машин и механизмов с упругими связями возникают задачи формирования желаемых (требуемых) показателей эффективности их работы, которые в первую очередь определяются свойствами механической части современного привода.

Модель расчета механической части системы обеспечивает вычисление всех координат системы, критериев оценки эффективности работы системы и является определяющим фактором формирования закона управления. Обеспечение заданных показателей эффективности может достигаться либо за счет применения оптимальных варьируемых параметров, полученных при многокритериальной оптимизации машин и механизмов, либо за счет использования управляющего воздействия, действующего на отдельные элементы механической системы, либо одновременного на группу элемен-

тов. В этом случае приходится решать задачи поиска оптимальных параметров системы управления, определять оптимальное управляющее воздействие для заданной системы и численные значения параметров управления.

## 2. Цель статьи

Цель статьи состоит в рассмотрении особенностей построения модели оптимизационного расчета (МОР) механической системы на основе использования сеточного  $ММ_τ$ -поискового метода многокритериальной оптимизации и синтеза закона управления, обеспечивающей повышение эффективности функционирования механизмов, машин и комплексов, как составной части технологического оборудования, за счет определения оптимальной совокупности параметров, режимов работы и применения оптимального закона управления, которые улучшают энергетические и динамические показатели анализируемого объекта.

## 3. Обзор и анализ

Совершенствование механических систем с упруго-связанными электромеханическими элементами, в первую очередь связано с уменьшением динамических усилий. Для нерегулируемого привода используют метод пассивного демпфирования системы [1, 2]. Регулируемый привод обеспечивает дополнительные условия формирования условий работы таких систем [3]. Среди машиностроителей зарекомендовал хорошо известный метод исследования пространства параметров (ИПП), который обеспечивает поиск оптимальных параметров при многокритериальной оптимизации. Дальнейшим развитием ИПП является сеточный  $ММ_τ$ -поисковый метод многокритериальной оптимизации и синтеза закона управления [4]. Эти методы предусматривает использование модели оптимизационного расчета исследуемой нелинейной динамической системы для определения оптимальной совокупности варьируемых параметров, структуры системы управления, для разработки рекомендаций по реализации системы управления. Метод обеспечивает исследование пространства большой размерности за счет использования генератора SobolSeq370 и генератора SobolSeq32000, обеспечивает расположение оптимальных траекторий системы в окрестности притягивающего многообразия, построенного на основе неформализованных процедур анализа системы. Желаемые свойства движения уравнений системы, т.е. программа и движение, заданы некоторой совокупностью инвариантных многообразий, удовлетворяющих, в частности, функциональным уравнениям, которые являются уравнениями Эйлера-Лагранжа для сопровождающего функционала.

## 4. Модель оптимизационного расчета исходной системы

Процессы в упруго-связанной двухмассовой механической системе (ДМС) и электрической в виде электропривода постоянного тока наиболее успешно отражены в линеаризованной модели двухмассовой электромеханической системы (ДЭМС), приближённо описывающей поведение реальных систем электропривода по доминирующим низкочастотным модам упругих колебаний [2, 3]. Эта модель доминирует в теории и практике автоматизированного электропривода и активно используется специалистами в области теории автоматического управления для подтверждения эффективности вновь разрабатываемых методов синтеза САУ.

Для решения задач многокритериальной оптимизации разработан программный комплекс АМИПП (адаптивный метод исследования пространства параметров) [5], который обеспечивает удобную диалоговую среду пользователю. В [5] подробно рас-

смотрены особенности построения системы и работа программного комплекса, приведены технические требования к оформлению модели оптимизационного расчета и ссылки на программные модули системы. Еще необходимо отметить, что система обеспечивает учет большого числа варьированных параметров и локальных критериев и ограничений при поиске оптимальных параметров и синтезе закона управления исходной системы.

Модель оптимизационного расчета является расширенной моделью, включающей исходную систему дифференциальных уравнений (1), вычисления локальных интегральных критериев (2) через решения дифференциальных уравнений (1), критериальные ограничения (3)

$$\dot{x}_i(t) = f_i(x, t, a, \zeta) + g_i(x)u_i, \quad i = \overline{1, r}, r \leq n, \\ \dot{x}_j(t) = f_j(x, t, a, \zeta), \quad j = \overline{1+r, n}, \quad (1)$$

$$\Phi(i_{rq})_i = F_i(x(t), u(t)), \quad i = \overline{1, m}, \quad (2)$$

$$J_{0l} = r_l(x, u) \quad l = \overline{1, p}. \quad (3)$$

Рассматривается ДЭМС на примере типовой структуры электропривода с упругим звеном, которая имеет следующие обозначения и допущения:  $M_e$  – электромагнитный момент двигателя, Нм;  $I$  – ток якорной цепи двигателя, А;  $sw, cm, c\Phi_n$  – произведения конструктивной постоянной и магнитного потока двигателя, Вс;  $R_e$  – эквивалентное сопротивление якорной цепи системы, Ом;  $T_e$  – электромагнитная постоянная времени якорной цепи, с;  $E_n$  – э.д.с. управляемого преобразователя, В;  $T_\mu$  – постоянная времени преобразователя, с;  $k_n$  – коэффициент усиления преобразователя, В/В;  $U_y$  – управляющее напряжение, В;  $\zeta = M_{sop}$  – внешнее воздействие;  $\omega_1$  – угловая скорость ротора двигателя и жесткосоединенных с ним маховых масс с общим моментом инерции  $J_1$ ;  $\omega_2, M_y$  – приведенные к валу двигателя угловая скорость исполнительного органа механизма с моментом инерции  $J_2$  и момент в упругом звене;  $c_{12}$  – приведенный коэффициент крутильной жесткости упругого звена;  $M_{sop}$  – момент сопротивления нагрузке (независимая функция времени).

Для системы введены относительные фазовые координаты:  $x_1 = \omega_1, x_2 = \omega_2, x_3 = M_{12}, x_4 = I, x_5 = E_n$ . При построении переходных процессов ДЭМС использовались следующие значения параметров системы:  $J_1 = 0,102 \text{ кгм}^2; J_2 = 0,4 \text{ кгм}^2; c_{12} = 2000 \text{ Нм/рад}; M_c = \zeta = 30 \text{ Нм}$  (задан графиком);  $sw = 1,125; cm = 1,19$ . Обозначения:  $x(1) = x_1, x(3) = x_3, M_{sop} = \zeta, M_e = cm x_4$  при пуске системы при  $u = M_e = \beta (x_1^* - x_1)$ .

$$\dot{x}_1 = (b_{11} x_4 - x_3,) b_1, \\ \dot{x}_2 = (x_3 - \zeta,) b_2, \\ \dot{x}_3 = (x_1 - x_2,) b_3, \\ \dot{x}_4 = (b_{41} x_5 - b_{42} x_1 - x_4,) b_4,$$

$$\dot{x}_5 = b_{51} u - b_{52} x_5,$$

где  $b_{11} = cm$ ,  $b_1 = \frac{1}{J_1}$ ,  $b_2 = \frac{1}{J_2}$ ,  $b_3 = C_{12}$ ,  $b_{41} = \frac{1}{R_e}$ ,  $b_{42} = \frac{cw}{R_e}$ ,  $b_4 = \frac{1}{T_e}$ ,  $b_{51} = \frac{k_n}{T_\mu}$ ,

$$b_{52} = \frac{1}{T_\mu}.$$

Исходная модель двухмассовой механической системы (первые три уравнения системы) определяет колебательный переходной процесс системы с максимальным значением упругого момента до 120 Нм.

Для этой системы изменение характера переходных процессов возможно за счет изменения параметров системы и силового воздействия  $M_e$ , которое обычно формируется приводом.

### 5. Модель оптимизационного расчета системы управления ДЭМС

При формировании закона управления использовались работы А. А. Колесникова по определению структуры модели, закона управления, вопросы о расширении и сжатии фазового пространства [6]. К системе уравнений (1)-(3) необходимо добавить основные уравнения движения макропеременных (4), уравнение сопровождающего функционала (5), выражения принятых макропеременных (6) и математическое выражение вычисления управляющего воздействия  $u(x)$ , полученное на основе аналитической составляющей метода:

$$\dot{\psi}_l(t) = -1/T_l \xi_l(\psi_l), \quad l = \overline{1, s}, \tag{4}$$

$$\dot{\Phi}(t)_\Sigma = \sum_{l=1}^s \xi_l^2(\psi_l) + \sum_{l=1}^s T_l^2 \dot{\psi}_l^2(t), \tag{5}$$

$$\psi_l = \psi_l(x_l - x_l^0), \quad l = \overline{1, s}. \tag{6}$$

Для ДМС необходимо найти закон управление в виде функции координат вектора пространства состояний системы (1) при условии, что параметры системы (1) и внешние возмущение определены ориентировочно в заданном диапазоне изменения для задач стабилизации скорости первой и второй массы и задачи управления упругими колебаниями ДМС. Закон управления определяется структурой  $st(x, \zeta, \omega, t)$  и вектором варьируемых параметров  $va$ . В этом случае за счет целенаправленного изменения управления  $u$  осуществляется переход объекта из  $x^0$  в заданное  $x^k$  конечное, при этом должны выполняться все ограничения и обеспечиваться выполнение экстремумов критериев.

Динамическая цель управления для расширенной системы (1)-(6) связана с выполнением следующих заданных условий:

- макропеременные  $\psi_1$  и  $\psi_3$  соответственно определяют движение первой массы  $\psi_1$  и величину упругих усилий  $\psi_3$

$$\Psi_1 = x_1 - \gamma = 0, \quad \Psi_3 = x_3 - x_3^* = 0; \tag{7}$$

- критерии и ограничения выполняют оценки переходных процессов

$$\Phi_1 = \int_0^{\infty} (\varphi^2(\psi) + \omega^2(t)\psi^2(t))dt \rightarrow \min, \tag{8}$$

$$\Phi_2 = \sigma_{x_3}, \quad \Phi_3 = |\psi_1|, \quad \Phi_4 = |\psi_3|,$$

где  $x_3^*$  — заданная величина усилий,  $\sigma_{x_3}$  — перерегулирование  $x_3$ .

Макропеременная  $\psi_3$  является внутренней при формировании управляющего воздействия для координаты  $x_1$ , которое определяется на основе решения основного уравнения движения (4), (7)

$$\frac{\partial \psi_3}{\partial x_3} f_3 + \omega_3^{-1} \psi_3 = 0, \tag{9}$$

$$c_{12}(x_1 - x_2) + \omega_3^{-1}(x_3 - x_3^*) = 0.$$

Выполнение условия  $\psi_1 = 0$ , определяет,  $\gamma = x_1$  и (9)

$$\Psi_1 = x_1 - x_2 + \frac{1}{c_{12}\omega_3}(x_3 - x_3^*) = 0. \tag{10}$$

$$st(x, \zeta, \omega, t) = \left( -\frac{1}{J_1} \right)^{-1} \begin{pmatrix} \frac{\partial \psi_1}{\partial x_1} f_1 = -\frac{x_3}{J_1}, \\ \frac{\partial \psi_1}{\partial x_2} f_2 = -(x_3 - \zeta) / J_2, \\ \frac{\partial \psi_1}{\partial x_3} f_3 = \frac{1}{\omega_3 c_{12}} c_{12}(x_1 - x_2), \\ \varphi(\psi, \omega, t) = \omega_1^{-1} \left( x_1 - x_2 + \frac{1}{c_{12}\omega_3}(x_3 - x_3^*) \right) \end{pmatrix}. \tag{11}$$

$$u = f(st, va) = a_1 x_3 - a_2 \zeta - a_3 (x_1 - x_2) + a_4 x_3^*, \tag{12}$$

где  $a_1 = 1 + \frac{J_1}{J_2} - \frac{J_1}{c_{12} \omega_1 \omega_3}$ ,  $a_2 = \frac{J_1}{J_2}$ ,  $a_3 = J_1 \left( \frac{1}{\omega_1} + \frac{1}{\omega_3} \right)$ ,  $a_4 = \frac{J_1}{c_{12} \omega_1 \omega_3}$ ,  
 $va = (J_1, J_2, c_{12}, \omega_1, \omega_3)$  — вектор параметров закона (12).

Закон (12) в общем виде определяет стратегию построения системы управления ДМС при выполнении условия допустимости измерения всех координат состояния  $x$  и внешнего возмущения  $\zeta$ . В общем виде отражает хорошо известную форму модели по ошибке. Последнее слагаемое  $a_4 x_3^*$  определяет силовое воздействие ( $U_{mo} = M_e$ ) заданного движения ДМС, которое формируется электрическим двигателем (рис. 1).

При рассмотрении системы управления ДЭМС выделим следующие положения:

Если рассматривается стабилизация скорости ДМС, для которой введены следующие макропеременные

$$\psi_1 = x_1 - x_1^* = 0, \tag{13}$$

то макропеременная (13) определяет закон управления механической системой:

$$u_{mo} = f(st, va) = a_1 x_1 + a_2 (x_1 - x_2) + a_3 x_3. \tag{14}$$

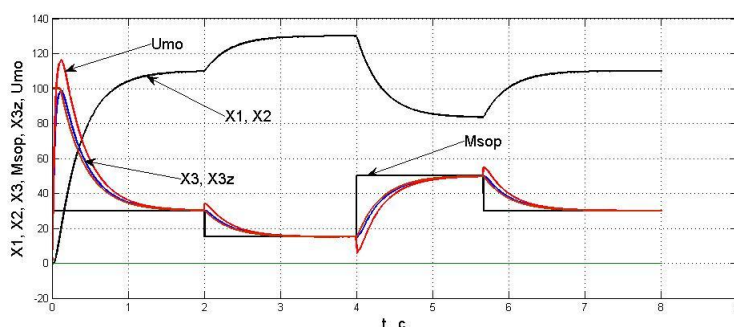


Рисунок 1. Процессы упругой механической системы.

Построение закона управления упругими усилиями [7] выполняется из рассмотренных условий (7), (10), закона (12) и условия

$$\Psi_4 = x_4 - \frac{1}{cm} U_{mo} = 0. \tag{15}$$

Использование алгоритма (11) определяет закон управления ДЭМС

$$U_4 = f(st, va) = d_1 x_3 - d_2 x_4 + d_3 U_{mo}, \tag{16}$$

где  $d_1 = cw$ ,  $d_2 = \left( \frac{1}{T_e} - \frac{1}{\omega_4} \right) R_e T_e$ ,  $d_3 = \frac{T_e R_e}{\omega_4 cm}$ .

Управление тиристорным преобразователем определяется из выполнения условия

$$\Psi_5 = x_5 - U^* = 0. \tag{17}$$

Закон управления с учетом тиристорного преобразователя имеет вид

$$U_5 = f(st, va) = d_4 x_5 - d_5 U^*, \tag{18}$$

где  $d_4 = \frac{1}{k_{tn}} - \frac{T_\mu}{\omega_5 k_{tn}}$ ,  $d_5 = \frac{T_\mu}{\omega_5 k_{tn}}$ ,  $U^*$  — закон управления (16) ДЭМС,  $V_a = [b_1, \omega_4, \omega_5, k_{tn}, T_e]$  — вектор параметров, *if*  $\zeta \geq \zeta_{крит}$ , *else*  $U = 0$  — выполняется останов движения системы.

На рис. 2 приведены графики переходных процессов управления электроприводом с тиристорным преобразователем и с защитой от стопорения исполнительного органа.

В основе системы управления ДЭМС с асинхронным электродвигателем заложен принцип трансвекторного управления (FOC), который заключается в раздельном управлении магнитным потоком и моментом АД с помощью независимых составляющих тока статора, соответствующих проекциям вектора тока на оси системы координат.

нат, ориентированной по направлению вектора магнитного потока. Это определение соответствует управлению токами якоря и обмотки возбуждения ДПТ. Рассматривается расчетная модель двигателя, которая используется при формировании закона управления различных систем управления.

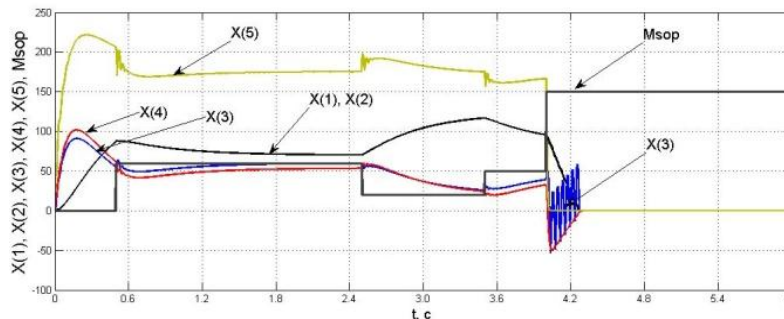


Рисунок 2. Режим нагрузки и остановки.

При построении модели оптимально расчета регулятора скорости АД рассматривается система токового управления:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 = \dot{\psi}_r &= \frac{R_r L_m}{L_r} i_{id} - \frac{R_r}{L_r} x_1, \\ \dot{x}_2 = \dot{\omega} &= (M_e - M_s) / J_1, \\ M_e &= \frac{3 L_m P_n}{2 R_r} \psi_r i_{1q}, \end{aligned} \tag{19}$$

где  $\psi_r, R_r, L_r, L_m, P_n, i_{1d}, i_{1q}, k_m$  – параметр параметры асинхронного двигателя.

Для построения закона управления принимаем макропеременную  $\psi_2$ :

$$\psi_2 = x_2 - x_2^* = 0. \tag{20}$$

Из условия (20) следует  $x_1 = \frac{1}{b_8 i_{1q}} M_s - \frac{1}{i_{1q}} (x_2 - x_2^*)$ .

Считаем, что поток сцепления  $\psi_{2e}$  находится в зависимости от частоты вращения

$$\psi_1 = x_1 - \gamma = 0, \quad \gamma = x_1. \tag{21}$$

Используя уравнение (19) и макропеременную (21) определяем закон управления

$$u(i_{1d}) = \rho_1 x_1 + \rho_2 \frac{1}{i_{1q}} M_s - \rho_3 \frac{1}{i_{1q}} (x_1 - x_1^*), \tag{22}$$

где

$$\rho_1 = \frac{1}{b_6} \left( b_1 - \left( \frac{1}{T_1} + \frac{1}{T_2} \right) \right), \quad \rho_2 = \frac{1}{b_6 b_8} \left( \frac{1}{T_1} + \frac{1}{T_2} \right), \quad \rho_3 = \frac{1}{b_1 b_6 b_8 T_1 T_2}, \quad b_6 = \frac{L_m R_r}{L_r}, \quad b_8 = \frac{3 L_m p_n}{2 L_r},$$

$T_1, T_2$  – весовые параметры оптимизации закона управления.

Полученный закон управления (22) отражает зависимость от координаты скорости  $x_1$ , значения момента сопротивления  $M_s$  и задающего условия режима работы. Аналитическая составляющая устанавливает структуру закона в зависимости от физических свойств объекта управления (координат и параметров системы)

На рис. 3 приведена реализация токового закона управления, который широко используется в промышленных системах частотного управления АД.

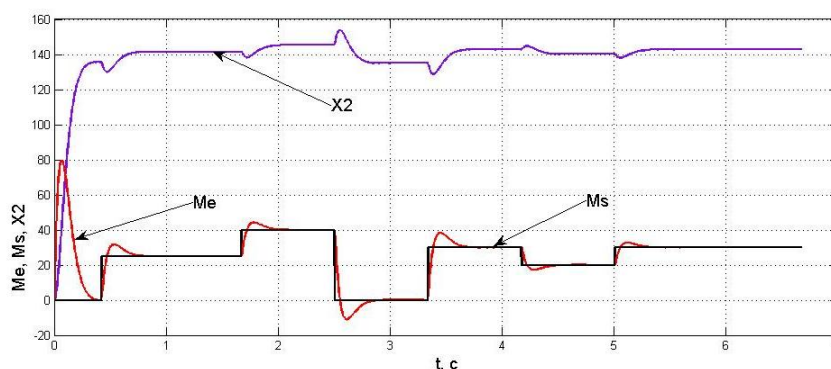


Рисунок 3. Система токового управления.

### 6. Оптимизационный поиск параметров ДМС с наблюдателем состояния

Исходный объект управления (6) допускает измерение только угловой скорости  $x_1$ , все остальные координаты недоступны измерению. Реализация закона управления (12) связана с процедурой восстановления координат  $\hat{x}_1, \hat{x}_2, \hat{x}_3, \hat{x}_4, \hat{x}_4 = \zeta$  системы уравнений ДМС, что приводит к следующей записи (1).

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= (u - x_3) b_1, \\ \dot{x}_2 &= (x_3 - \zeta) b_2, \\ \dot{x}_3 &= (x_1 - x_2) b_3, \\ \hat{x}_1 &= (\hat{u} - x_3) b_1 + h_1 (x_1 - \hat{x}_1), \\ \hat{x}_2 &= (\hat{x}_3 - \hat{x}_4) b_2 + h_2 (x_1 - \hat{x}_1), \\ \hat{x}_3 &= (\hat{x}_1 - \hat{x}_2) b_3 + h_3 (x_1 - \hat{x}_1), \\ \hat{x}_4 &= h_4 (x_1 - \hat{x}_1), \\ \hat{u} &= a_1 \hat{x}_3 - a_2 \hat{x}_4 - a_3 (\hat{x}_1 - \hat{x}_2) + a_4 \beta (x_1^* - \hat{x}_1). \end{aligned} \tag{23}$$

Задан вектор параметров  $va = [J_1, J_2, c_{12}, \omega_1, \omega_3, h_1, h_2, h_3, h_4]^T$ . Поиск оптимальных значений вектора варьируемых параметров  $va$  связан с выполнением принятых условий, для которых момент инерции  $J_1$  может изменяться в небольших пределах



$0,09 \leq J_1 \leq 0,11$ , а другие параметры определены ориентировочно  $0,3 \leq J_2 \leq 0,5$ ,  $2000 \leq c_{12} \leq 3000$ . Коэффициенты закона также подлежат определению.

Для них задан следующий диапазон изменения  $0,008 \leq \omega_1 \leq 0,05$ ;  $0,008 \leq \omega_3 \leq 0,05$ ;  $10,0 \leq h_1 \leq 500,0$ ;  $1,0 \leq h_2 \leq 1000,0$ ;  $1,0 \leq h_3 \leq 5000,0$ ;  $1,0 \leq h_4 \leq 10000,0$ ; момент сопротивления задан графиком. Задано необходимое начальное, конечное состояние, шаг интегрирования, точность. При выполнении расчётов каждого критерия модели оптимизационного расчёта введены критериальные ограничения на максимальные значения. Согласно рекомендации [5] при оптимизации принято число расчетных вариантов  $I = 1024$ . В результате решения задачи оптимизации параметров системы (23) с учетом макропеременных (7), критериев (8), с общим числом расчетных вариантов 1024, сформировано множество расчетных вариантов  $I_0(i_{rt}) = \{102, 128, 331, 625, 753, 867, 1012, -1\}$ , оптимальное по Парето. На множестве  $I_0(i_{rt})$  принят вариант  $i_{rt}^o = 753$ , исходя из условия равноправности всех критериев со следующими значениями вектора варьируемых параметров:  $J_1 = 0,105 \text{ кгм}^2$ ;  $J_2 = 0,365 \text{ кгм}^2$ ;  $c_{12} = 2358 \text{ Нм/рад}$ ;  $\omega_1 = 0,0328$ ;  $\omega_3 = 0,0137$ ;  $h_1 = 430,6$ ;  $h_2 = 35,15$ ;  $h_3 = 16,65$ ;  $h_4 = 9111$ . Для принятого варианта расчёта  $i_{rt}^o = 753$  на рис. 4 приведены графики переходных процессов  $u$ ,  $x(1) = x_1$ ,  $x(3) = x_3$ ,  $M_c = \zeta$  полученного закона, а на рис. 5 графики восстановленных координат  $u = \hat{u}$ ,  $x(1.1) = \hat{x}_1$ ,  $x(3.1) = \hat{x}_3$ ,  $x_4 = \hat{x}_4 = \hat{\zeta}$ .

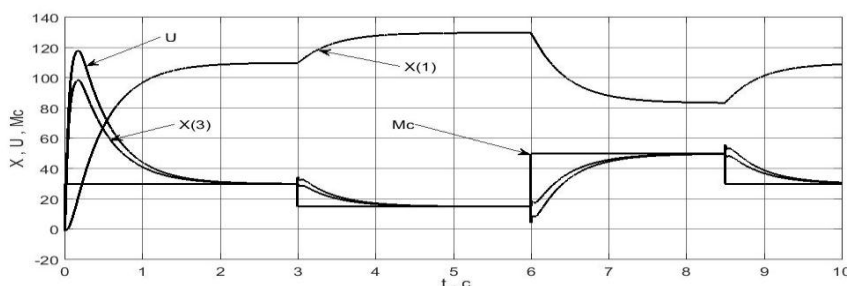


Рисунок 4. Графики переходных процессов системы (23).

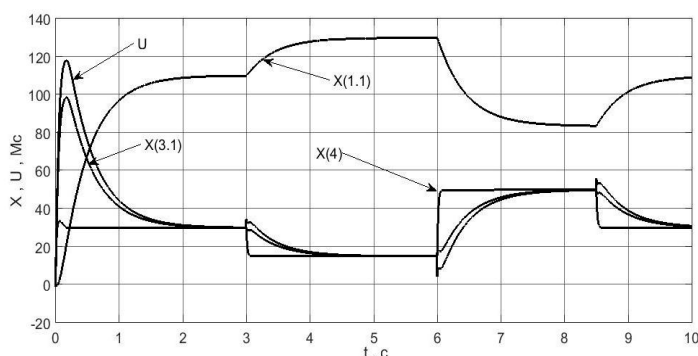


Рисунок 5. Восстановление координат системы (23).

### 7. Заключение.

Приведенные в статье исследования позволяют сформулировать следующие:

1. Сеточный  $ЛП_\tau$ -поисковый метод многокритериальной оптимизации и синтеза закона управления предусматривает использование модели оптимизационного расчета

нелинейной динамической системы для определения оптимальной совокупности варьируемых параметров, структуры системы управления, для разработки рекомендаций по реализации системы управления. Метод обеспечивает исследование пространства большой размерности за счет использования генератора SobolSeq370 и генератора SobolSeq32000, обеспечивает расположение оптимальных траекторий системы в окрестности притягивающего многообразия, построенного на основе неформализованных процедур анализа системы. Желаемые свойства движения уравнений системы, т.е. программа и движение, заданы некоторой совокупностью инвариантных многообразий, удовлетворяющих, в частности, функциональным уравнениям, которые являются уравнениями Эйлера-Лагранжа для сопровождающего функционала.

2. Поисковый метод определяет алгоритм синтеза системы управления. Алгоритм выполняет определение математического выражения структуры и отыскания значений вектора переменных параметров управления нелинейной динамической системы с учетом неопределенности параметров и внешних факторов.

3. Разработанный метод позволяет инженерному составу решать прикладные задачи оптимизации и синтеза законов управления различных промышленных систем.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Пятибратов, Г. Я. Ресурсосберегающее управление усилиями в упругих передачах и исполнительных устройствах электромеханических систем и комплексов / Г. Я. Пятибратов // Труды V Международной (16 Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2007. – СПб.: СПбГПУ, 2007. – С. 58-60.

2. Ключев, В. И. Теория электропривода / В. И. Ключев. – М.: Энергоатомиздат, 2001. – 704 с. ISBN 5-283-00642-5.

3. Панкратов, В. В. Синтез двухмассой электромеханической системы регулируемой скорости методом сигнально-адаптивной обратной модели / В. В. Панкратов, Е. С. Кучер, А. А. Татарникова // VIII Международная (XIX Всероссийская) конференция по автоматизированному электроприводу АЭП 2014. – Саранск: Изд-во Морд. ун-та, 2014. – Т.1. – С. 234-239.

4. Кузнецова, О. А. Сеточный ЛПТ-поисковый метод многокритериальной оптимизации и синтеза закона управления сложным динамическим объектом / О. А. Кузнецова // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научных работ. – Донецк: ДонНТУ, 2018. – Вып. 4 (63). – С. 49-59.

5. Кузнецова, О. А. Адаптивный метод исследования пространства параметров / О. А. Кузнецова. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2012. – 288 с. ISBN 978-5-7679-2323-6.

6. Колесников, А. А. Синергетические методы управления сложными системами: Теория системного синтеза. / А. А. Колесников. – М.: КомКнига, 2006. – 240 с. ISBN 5-484-00198-6.

7. Кузнецова, О. А. Поисковый метод синтеза закона управления упругим моментом электропривода постоянного тока / О. А. Кузнецова // Электромеханические системы и комплексы. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2015. – С. 224-234.

Поступила в редколлегию 25.03.2021г.

<sup>1</sup>А. Н. Михайлов, д-р техн. наук, проф., <sup>2</sup>Б. С. Котляров, канд. техн. наук,  
<sup>3</sup>В. Б. Котляров, инженер, <sup>2</sup>С. Б. Котляров, инженер

<sup>1</sup> ГОУВПО «Донецкий национальный технический университет»

<sup>2</sup> Ялта, Россия

<sup>3</sup> Москва, Россия

Тел: +7(988)-55-40-021; +7(985) 021-79-06, +7(964) 70-45-362;

E-mail: <sup>1</sup>tm@fimm.donntu.org; <sup>2</sup>boris.kotlyarov@mail.ru; <sup>3</sup>[validarkotlarov@mail.ru](mailto:validarkotlarov@mail.ru)

## ОБЕСПЕЧЕНИЕ СВОЙСТВ И СТРУКТУРЫ МАТЕРИАЛА ДЕТАЛИ С ПОМОЩЬЮ ФУНКЦИОНАЛЬНО-ОРИЕНТИРОВАННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

*В статье описаны результаты исследований формирования структуры материала и свойств материала деталей, заданных согласно требованиям конструкторской документации, достигаемые с применением функционально-ориентированных технологий (ФОТ). Рассматриваются свойства на всю глубину от поверхностного слоя до сердцевины на всех участках, частях всех элементов деталей путем дополнительных технологических воздействий с функционально-ориентированной направленностью. Способы формирования различных свойств структуры материала деталей с помощью выбора термохимической, электрохимической, физико-химической, ионно-плазменной, лазерной и других видов обработки обеспечивают повышение механических, физических, химических, и иных характеристик деталей в процессе эксплуатации. Установлен алгоритм поиска оптимальных схем формирования эксплуатационных свойств функционально значимых элементов и частей детали, зон, микрозон и нанозон на основе итеративного рекуррентного выбора оптимального способа функционально-ориентированного технологического воздействия из определенного множества ФОТ.*

**Ключевые слова:** деталь, часть, участок, зона, функционально-ориентированное технологическое воздействие, структура материала, свойства, твердость.

A. N. Mihailov, B. S. Kotlyarov, V. B. Kotliarov, S. B. Kotliarov

## ENSURING THE PROPERTIES AND STRUCTURE OF THE MATERIAL OF THE PART WITH THE HELP OF FUNCTIONALLY-ORIENTED TECHNOLOGICAL IMPACT

*The article describes the results of research on the formation of the material structure and material properties of parts specified in accordance with the requirements of design documentation, achieved using functional-oriented technological technologies (FOT). Properties are considered for the entire depth from the surface layer to the core in all sections, parts of all elements of parts by additional technological actions with a functional-oriented orientation. Methods for forming various properties of the material structure of parts by selecting thermochemical, electrochemical, physico-chemical, ion-plasma laser and other types of processing provide an increase in the mechanical, physical, chemical, and other characteristics of parts during operation. An algorithm for searching for optimal schemes for forming the operational properties of functionally significant elements and parts of a part, zones, microzones, and nanozones based on iterative recurrent selection of the optimal method of functionally oriented technological impact from a certain set of PHOTONS is established.*

**Keywords:** part, part, section, zone, functional-oriented technological impact, material structure, properties, hardness.

### 1. Введение

Материал для изготовления любой детали машиностроительного назначения определяется конструктором на начальном этапе проектирования на основании общей целевой функциональной предназначенности детали в целом, а также частным функциональным предназначением отдельных частей, элементов, зон, макрозон детали. Детали машин изготавливают из чугунов, сталей, сплавов на основе меди, алюминия, магния и титана, полимеров, стекла, гранита и других материалов. При выборе материала устанавливают соответствие его механических, физических и химических

свойств функциям, которые надлежит исполнять детали, и условиям ее работы. Материал выбирают также с учетом его технологических свойств.

Чаще всего выбирается материал для всей детали с однородными показателями физико-механических, химических и иных свойств. В зависимости от выполняемых функций в механизме принимается материал с заданной структурой строения, прочностью, допускаемыми напряжениями, химической стойкостью и т.д.

К механическим свойствам материала относят временное сопротивление при растяжении и сжатии, предел текучести, твердость, относительное удлинение, структуру остаточных напряжений и др. К физическим свойствам относят удельный вес, плотность, модуль объемного сжатия, модуль Юнга, температуру плавления и кристаллизации, теплопроводность, коэффициент линейного расширения, электрическое сопротивление и пр. Химические свойства материала прежде всего определяются его коррозионной стойкостью. Технологические свойства материала составляют обрабатываемость резанием и давлением, свариваемость, упрочняемость и т.д.

Требования к свойствам материала детали задаются системой номинальных значений показателей свойств и допусками, ограничивающими отклонения показателей от их номинальных значений. Обеспечение заданных номинальных значений свойств материала детали достигается целенаправленным дополнительным функционально-ориентированным ограниченным технологическим воздействием на материал, для чего устанавливается однозначное взаимоотношение между технологией и показателями конечных свойств материала детали.

## **2. Цель и задачи**

Цель настоящей работы заключается в создании формализованной взаимосвязи функционально значимых свойств материала детали с комплексом функционально ориентированных технологических схем воздействия, формирующих свойства материалов на разной глубине, полученных на разных этапах технологии изготовления детали и заданных конструкторской документацией. При этом способы формирования свойств материалов деталей рассматриваются как функции функциональных конструктивных целевых задач элементов деталей, выраженных посредством механических физических, химических, электрических и т.д. принципов, принятых для формирования свойств в поверхностном слое и в глубинных слоях материала. Установить множество схем технологических воздействий, которые обеспечивают достижение назначенных конструкторской документацией требований к поверхностным и глубинным свойствам материалов обрабатываемых деталей. Представить взаимосвязи функциональных проявлений деталей и функционально-ориентированных технологических воздействий в формализованном выражении.

Поставленная цель достигается решением некоторых частных задач.

1. Установить возможные эксплуатационные функции элементов и зон деталей во взаимосвязи с требованиями к качественным показателям свойств поверхностных и глубинных слоев деталей, заданных в КД.

2. Установить возможности достижения требований к материалам по КД за счет функционально-ориентированных технологических воздействий, образующих свойства в локализованных зонах материала на всю глубину обрабатываемых элементов и частей деталей, и представить все их многообразие в формализованном виде.

3. Создать предпосылки для синтеза возможного множества структурных схем ФОТ-воздействий на обрабатываемую деталь известным инструментом с учетом известных способов создания и корректировки свойств материала и использования дополнительных материальных физико-химических, газовых и иных сред,

позволяющих достигать требуемых характеристик и формируемых свойств на всех глубинах деталей.

4. Установить формализованную взаимосвязь требований КД на детали ко всем показателям качества материала обработанных частей и элементов детали, функционально значимым и заданных для конкретно локализованных участков детали в эксплуатации, и функционально-ориентированными технологическими воздействиями, осуществляемыми в составе технологических обрабатывающих комплексов, реализующих механические, физические, химические и др. материальные принципы преобразования свойств материалов.

### 3. Основное содержание работы

На машиностроительных предприятиях детали машин изготавливают из полуфабрикатов (получают отрезкой из проката, литьем, методами пластического деформирования, сваркой, металлические порошки, полимерные материалы и др. [1, 2, 3]).

В процессе изготовления детали материал заготовки подвергается силовым, тепловым, химическим и другим видам воздействий. Вследствие этого на каждом из этапов технологического процесса могут изменяться химический состав, структура, зернистость материала заготовки, а следовательно, и его механические, физические, химические свойства и состояние поверхностных слоев. Переход от свойств материала заготовки к свойствам материала готовой детали может быть представлен схемой, приведенной на рис. 1.

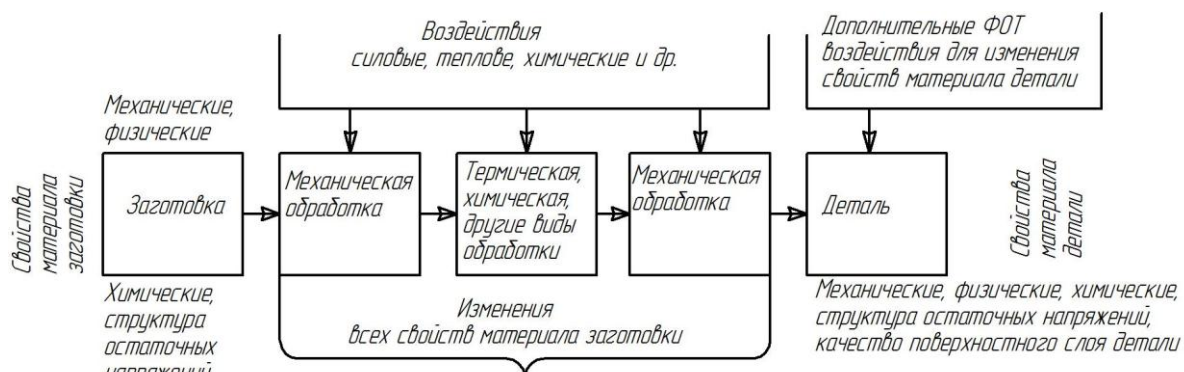


Рисунок 1. Переход от свойств материала заготовки к свойствам материала детали.

Анализ схемы показывает, что для обеспечения требуемых свойств материала детали необходимо:

1. Строить технологический процесс изготовления детали надо так, чтобы все воздействия на заготовку, в конечном счете, обеспечивали получение необходимых свойств материала детали, наряду с точностью ее геометрических параметров [1, 4, 5].

2. Исходя из требуемых свойств материала детали и с учетом изменений этих свойств в технологическом процессе изготовления по направлению к конечным свойствам детали согласно функциональному предназначению [6], предъявить комплекс требований к материалу заготовки.

3. Обеспечить соблюдение требований к материалу заготовки в технологических процессах ее изготовления.

4. Обеспечить дополнительное функционально-ориентированное технологическое (ФОТ) воздействие на деталь с целью достижения конечных параметров свойств, проявляемых в материале готовой детали.

Первичный выбор материала детали основывается на основных свойствах конструкционных материалов [1, 2, 4, 5, 6], выбираемых конструктором из всей массы предложений, например, приведенных на рис. 2.

Подавляющая масса деталей выполняется из металлов и сплавов, свойства которых существенно отличаются в изначальном состоянии, из неметаллических, композитных и иных, обладающих некоторыми специфическими свойствами и подлежащих обработке и изготовлению специальными средствами и на специальном оборудовании.

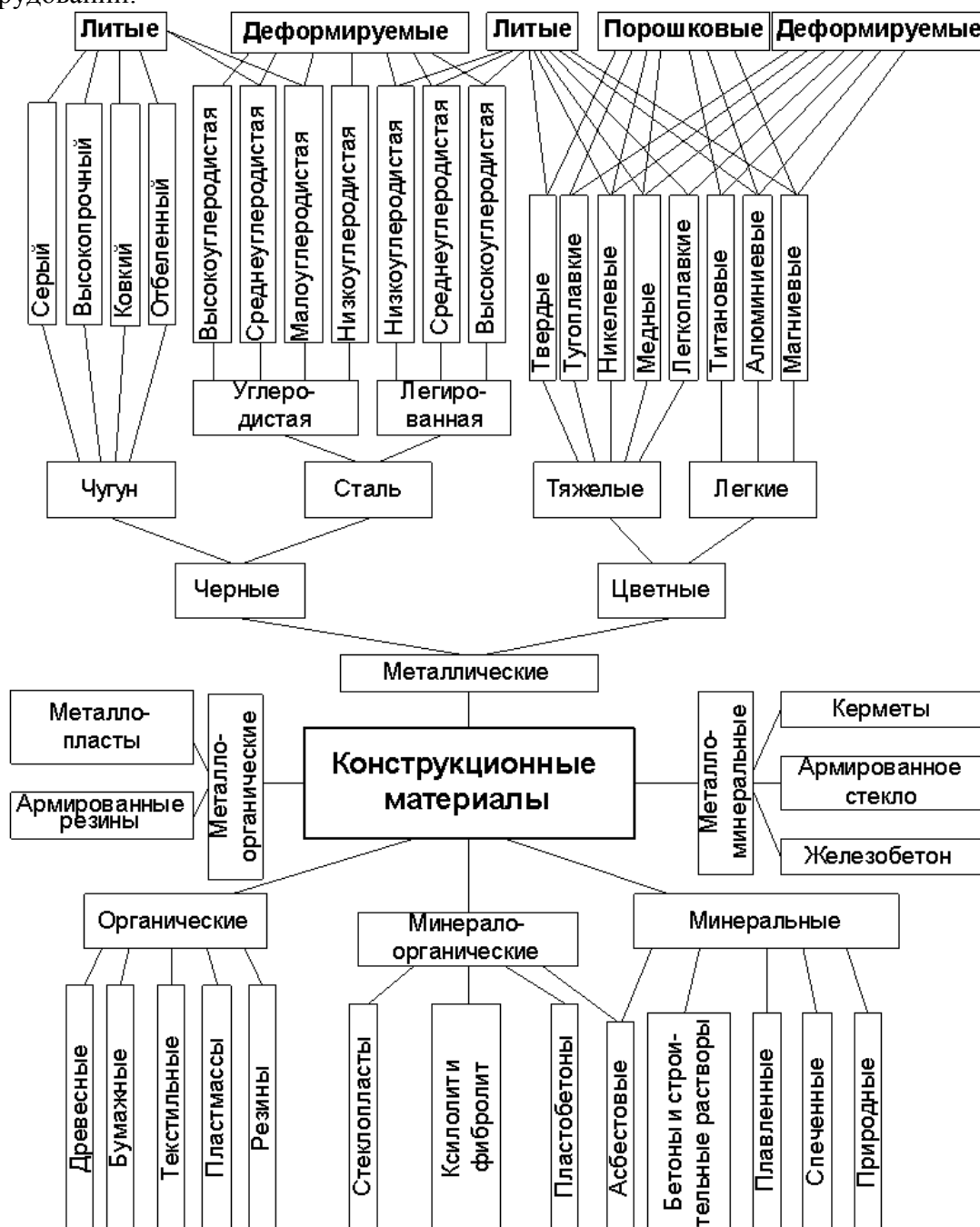


Рисунок 2. Основные группы конструкционных материалов в машиностроении.

На основе анализа функциональных задач участков, частей и зон детали, а также рассматривая их в качестве элементов некоторого множества атрибутов [6, 7], можно записать все функциональные признаки с четкой топономикой и указанием зон участков, обладающих особыми характеристиками, в общей системе координат детали. Верхние и нижние индексы символа функционального признака будут указывать на тип функции, выполняемой элементом детали, расположение в плане и по глубине в системе координат  $X_d Y_d Z_d$  детали и с указанием зоны, макро- или микрозоны участка детали.

Суммарные требования к свойствам материала детали формируются частными свойствами частей и участков этой детали с учетом всех специфических требований, продиктованных их функциональными предназначениями. В левой части выражения (1),

$$M_{\Sigma \partial}^{F_{\Sigma f_j} z_i} \in \left\{ M_{\partial}^{F_{\Sigma} \Phi_{X_d Y_d Z_d}^{CUMH}} \cap M_{\partial}^{F_{f_i} C_{X_i Y_i Z_i}^{CUMH_i}} \cap \dots \cap M_{\partial}^{F_{f_t} C_{X_t Y_t Z_t}^{CUMH_t}} \right\} \quad (1)$$

представлен весь комплекс всех функционально значимых требований к материалу детали, а в правой части перечисляются все частные требования к материалу в выполнении каждой функциональной задачи, относящейся к конкретным частям, участкам и зонам детали.

- M – означает в общем случае свойства материала;
- F – некая универсальная функция (структура, пористость, твердость, химические или физические свойства и т.д.), сущность которой обозначена индексом при F;
- f(j, i...t) – частная функция материала для каждого отдельного участка, части, макрозоны, зоны, нанозоны детали, выражающая какое-либо отдельное свойство (твердость, структурная решетка, вязкость и т.д.);
- C, Y, Z, M, H – часть, участок, зона, макро- и микрозона, нанозона детали, которым в детали присущи функции f(j, i...t), определенные по топономике в декартовой системе координат X(j, i...t), Y(j, i...t), Z(j, i...t) участка с переводом в систему координат детали  $X_d Y_d Z_d$ .

Все элементы в правой части выражения (1) представляют собой закрытое конечное подмножество для каждой конкретной детали, обладающей конечным числом возможных функциональных задач, решение каждой из которых возможно несколькими технологическими подходами. Все полное множество функционально-ориентированных технологических воздействий для достижения всех показателей материала участков и частей детали также представляет собой конечное множество элементов. Каждый элемент такого множества представляет собой конкретный набор материала, рабочей среды, оборудования, режима энергетического, информационного обеспечения технологического процесса, управления и иных составляющих для достижения требуемого свойства материала в заданной конкретной зоне или точке детали.

Так способ изготовления заготовки выбирают с учетом ее последующей обработки на основе технико-экономического анализа. На выбор способа влияют марка материала, размеры и конфигурация детали, требуемая точность размеров и качество



поверхностей заготовки, объем выпуска, тип производства, характер последующей механической и других видов обработки заготовки.

Разные процессы получения заготовок приводят к разным свойствам их материала. Структура и размер зерен материала отливки зависит от многих факторов: количества и свойства примесей в чистом металле или легирующих элементов в сплаве, температуры разлива, скорости охлаждения при кристаллизации, а также конфигурации, температуры, теплопроводности, состояния внутренних поверхностей литейной формы.

Свойства материала литой заготовки во многом зависят от ее конструкции. Конструкция отливки должна создавать возможность одновременного или последовательно направленного затвердевания ее частей. В первом случае желательна равномерность сечений стенок, а во втором – постепенное увеличение массивности стенок в предполагаемом направлении затвердевания металла. Неравномерное охлаждение различных частей отливки, сопротивление формы и стержней свободной усадке металла могут привести к образованию трещин, усадочных раковин и остаточных напряжений. В тонких местах стенок чугуновых отливок при быстром охлаждении происходит отбел поверхностей.

Пластическое деформирование металла также сопровождается изменением его физико-механических свойств. При начальной горячей обработке давлением (прокатка, ковка) литых слитков металла происходит деформирование его дендритной структуры, зерна металла вытягиваются и его механические свойства в продольном и поперечном направлениях становятся различными [8]. Прочность заготовки снижается.

Анализируя схему на рис. 2, где в укрупненном виде представлены группы конструкционных материалов, сравнивая с технологическими способами и возможностями достижения установленных показателей, можно для каждой группы функциональных показателей выражения (1) установить подмножество функционально-ориентированных технологических воздействий с конкретными технологическими показателями, обеспечивающими достижение требований КД к материалу в каждой зоне детали в допустимых размерных и сущностных пределах.

И основываясь на принципе рекуррентности, необходимо выбрать оптимальный технологический процесс формирования свойств материала для всей детали [9] и для ее зон по оценке критерия качества процесса (рис. 3).

Предельный критерий оценки качества выбираемого технологического процесса, обеспечивающего преобразования свойств материалов, должен представлять собой комплекс параметров по каждому отдельному свойству для всей детали в целом и для каждой части, зоны и элемента детали, и выстроенных в некоторой иерархической последовательности. Первым этапом выбора является рекуррентное сравнение технических требований к свойствам материала детали по КД, отражающих целевую функцию, с технологическими возможностями процесса преобразования и формирования новых свойств материала на отдельных участках детали. Положительным результатом может считаться попадание параметра свойства после технологического воздействия в зону, ограниченную максимальным (max) и минимальным (min) значением диапазона, в котором свойства обеспечивают целевую функцию детали.

Рассмотрим применение критериального диапазона оценки качества процесса на конкретном примере. Например, необходимо иметь металл с ударной вязкостью КС от 80 до 120 мДж/см<sup>2</sup>, а различные процессы термообработки позволяют для одного и того же материала получать результаты в пределах от 75 до 122 мДж/см<sup>2</sup>.

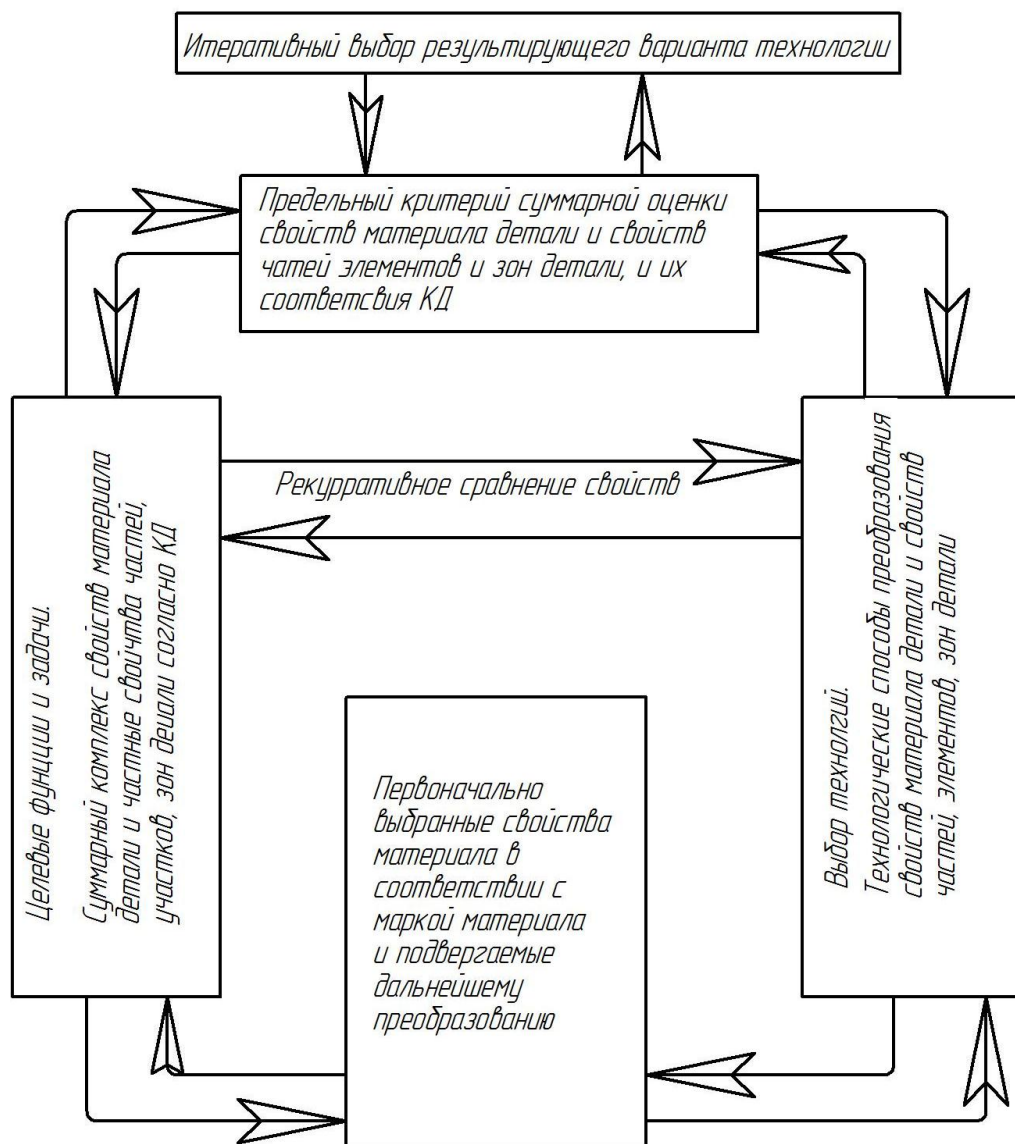


Рисунок 3. Выбор оптимального варианта технологического преобразования свойств материала детали на основании итеративного рекуррентного подхода.

Установим граничные условия в пределах  $KC^{max}=115\text{МДж/см}^2$ , и  $KC_{min}=85\text{МДж/см}^2$ . Тогда все технологические процессы с их материалами и оборудованием, значения КС которых лежат за пределами  $KC^{max}$  и  $KC_{min}$  значений, установленных в критериальном показателе, из дальнейшего процесса рекуррентного рассмотрения исключаются. Так же точно можно рассматривать показатели по модулю упругости  $E$  (МПа или  $\text{кгс/см}^2$ ), по величине внутренних напряжений  $\sigma$  (МПа), объемной плотности  $\rho$  ( $\text{г/см}^3$ ) и другие показатели.

Основные положения формирования свойств детали можно продемонстрировать на примере создания технологии изготовления ведущей шестерни КПП, работающей в режиме переключения передач без разрыва потока передаваемой мощности [9]. Эскиз шестерни с отдельными элементами представлен на рис. 4а, б, в, г, а схема нагружения зубьев колеса и шестерни в процессе переключения ступеней передач на рис. 5а, б.

Все поверхности шестерни обозначены буквами русского алфавита в своей

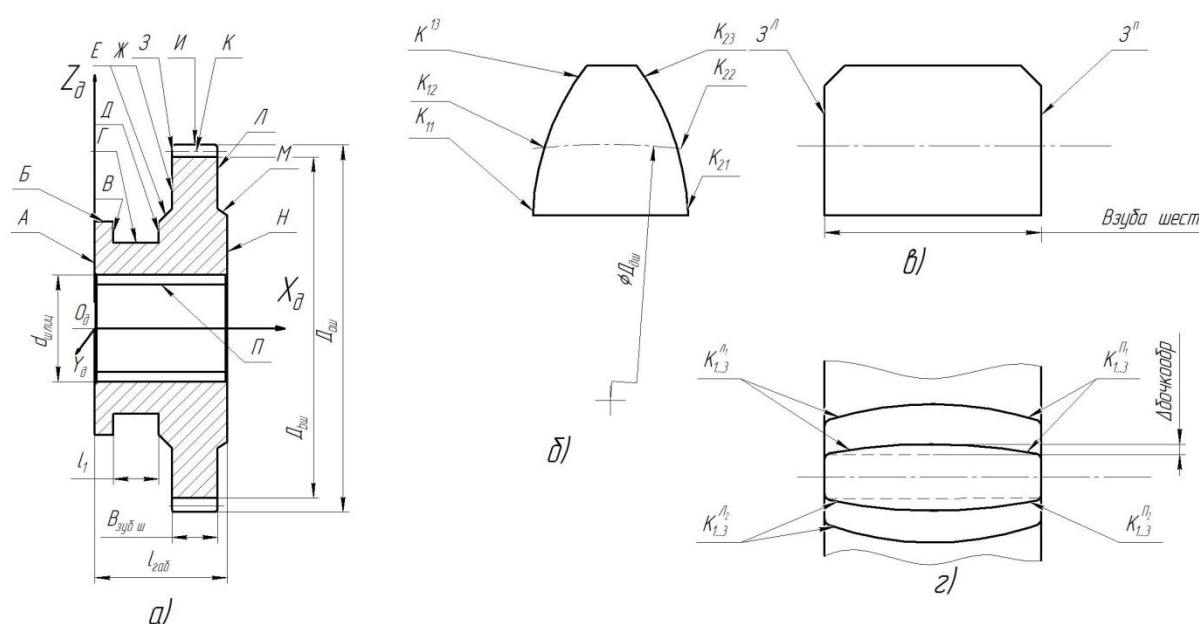


Рисунок 4. Эскиз ведущей шестерни КПП без прерывания потока передаваемой мощности

а) эскиз ведущей шестерни; б) торцовый профиль зуба шестерни; в) зуб шестерни в плане; г) продольная бочкообразная модификация зуба шестерни.

совокупности (от **А** до **П** для данной шестерни) образуют геометрическую форму детали. Но материал детали в зоне разных поверхностей (участков) шестерни выполняют различные функциональные задачи, и подвергаются разным внешним нагрузкам, вследствие чего имеют разную степень внутренних напряжений.

Так поверхности **В, Г, Д** предназначены для перемещения шестерни вдоль своей оси при переключении передач и вводе в зацепление с другим венцом колеса ведомого. При этом условия работы поверхностей – скольжение и трение по боковым поверхностям сухаря вилки переключения. Значит, поверхности должны обладать минимальной шероховатостью и максимальной износоустойчивостью.

Поверхности **П** указывают на боковые поверхности шлицевого отверстия. Работают боковые поверхности в условиях скольжения и боковых нагрузок при передаче крутящего момента вала на ступицу шестерни. Поверхности **Е, Ж, Л, М, Н** ограничивают ступицу, которая воспринимает и передает крутящий момент от шлицев на зубчатый венец, при этом нагрузки через внутренние напряжения материала ступицы. Поверхность **И** ограничивает диаметр выступов и нагрузок не воспринимает. Наиболее разнообразно нагружены зубья, это элементы шестерни, ограниченные поверхностями **З** и **К**. При этом боковые поверхности **З<sub>л</sub>** и **З<sub>п</sub>** зубьев, ограничивающие торцы зубьев сжимающие и растягивающие тангенциальные напряжения поверхностных слоев, а также сжимающие, растягивающие, изгибные и напряжения кручения, воспринимаемые внутренними слоями материала зубьев шестерни. В процессе переключения передачи зубья шестерни частично входят в зацепление с зубьями ведомых колес последовательно, начиная с зацепления одним краем, и в дальнейшем переходит к зацеплению посередине, и при дальнейшем переключении зацепление осуществляется другим краем зубьев, как показано схематически на рис. 5.

Максимальная нагрузка  $P_{max}$  последовательно от венца шестерни прилагается от

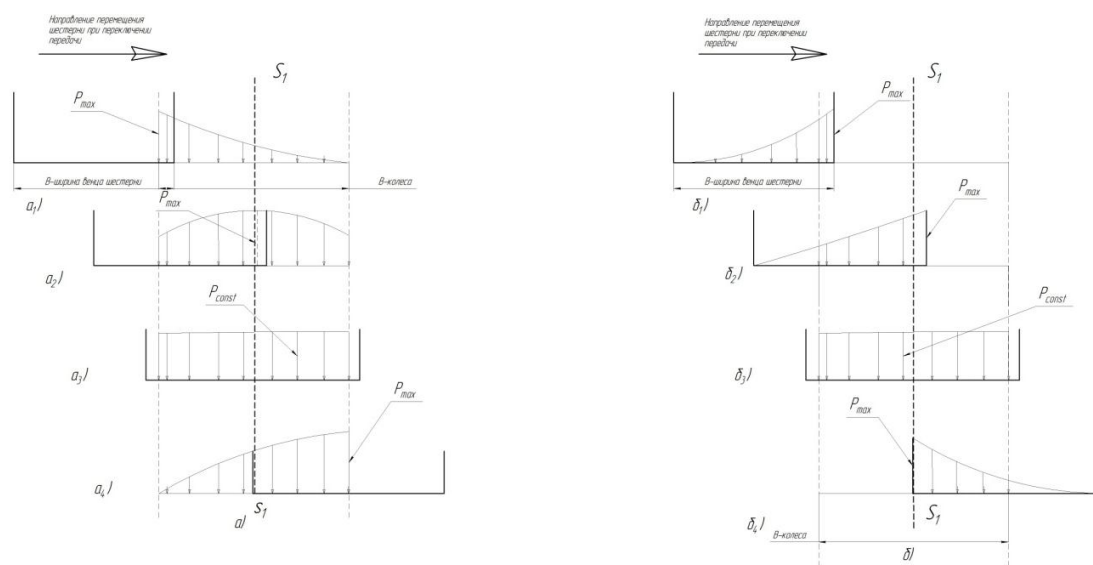


Рисунок 5. Схема нагружения зубьев колеса и зубьев шестерни КПП в процессе переключения ступеней передач без разрыва потока передаваемой мощности  
 а) нагрузка на зубья колес; б) нагрузка на зубья шестерни.

левого края к правому венца колеса, а в позиции стабильной работы в средней части зубьев нагрузка по ширине зуба распределяется равномерно. При приложении усилия в крайней части зуба происходит скручивание зуба вокруг средней линии  $S_1-S_1$  кроме усилий сжатия-растяжения по линии зацепления.

По величине допускаемых напряжения изгиба, растяжения-сжатия, кручения для шестерни можно выбрать материал сталь [10, 11, 12, 13, 14] (обычно для зубчатых колес редукторов и КПП выбирают сталь 20, сталь 40, сталь 45 и т.п.). Учитывая необходимость формирования особых свойств материала в зонах шлицевого отверстия и в зонах зубьев с повышенной твердостью поверхности с градиентом изменения по глубине, а также с переменной величиной шероховатости поверхности и твердости материала по высоте и ширине зубьев венца шестерни, материал нужно выбирать с возможностью формирования свойств, обеспечивающих дополнительные характеристики материала в зоне шлицев и зубьев по высоте и по боковому профилю.

Указанный характер обработки материала позволяет выбор цементируемых и азотируемых сталей с последующей термообработкой. С технологической позиции наиболее предпочтительным вариантом материала шестерни принимается сталь 20Х.

Формальное отображение всех требований к материалу детали по КД можно записать в виде выражения:

$$M_{D\Sigma}^{F\Sigma} \in M_{D\Phi}^{(A,B,\dots\Pi)} \cap M_{\text{шлиц}}^{F_{1..2\text{бок}}(\text{ХдYдZд})} \cap M_{\text{чд}}^{K_{(L,\Pi)}(1,2,\dots,m)\text{ХдYдZд}}, \quad (2)$$

где в левой части – все суммарные требования к материалу детали, а в правой части частные требования:

- первый элемент означает формообразование и сохранение формы и размеров детали;
- второй элемент выражения (2) выражает особые требования к твердости и шероховатости поверхностей шлицевого отверстия;

- а третий элемент выражает требования к материалу поверхностей зубьев шестерни по всей ширине зубьев и по высоте профиля зубьев.

В соответствие указанным требованиям к материалу детали рекуррентным подбором из множества технологий выбирается оптимальный вариант материала и способа технологического преобразования в определенных зонах координатной сетки, согласно схеме на рис.3, обеспечивающего необходимые твердость на заданную глубину и шероховатость поверхности в указанных зонах элементов детали.

Выбранный материал для всей детали по допускаемым напряжениям выражен в виде  $T_{\Phi_{\partial}}^{M_{\Sigma_{\partial}}^{ПрокатСм20X}}$ , т.е. сталь 20X в виде сортового проката – круг необходимого диаметра с последующей отрезкой и механической обработкой. Для участка шлицев после термообработки шестерни и шлифования внутреннего диаметра шлицевого отверстия вид формализованного отражения технологического воздействия может

иметь следующий вид:  $T_{\Phi_{\partial}^{XYZ}}^{F_{(t^{\circ}, MO, \Re \alpha)}^{\Pi(1,2,...m)}}$ , где в индексации символа Т технологического воздействия указаны виды термообработки с последующей механической дообработкой группы поверхностей  $\Pi$  шлицевого отверстия, локализация которых определена в системе координат XYZ детали.

Для поверхностей зубьев шестерни требования к свойствам материала можно записать в виде  $T_{\Phi_{\partial}^{XYZ}}^{F_{(t^{\circ}, MO, \Re \alpha)}^{K^{(L, \Pi)}(1,2,...,z)}}$  ; где в индексации символа Т технологического воздействия указаны виды термообработки с последующей механической дообработкой группы поверхностей К с бочкообразной модификацией зубьев. Каждый зуб шестерни от 1-го до z-го определен в координатах своей внутренней координатной системы  $X_{zj} Y_{zj} Z_{zj}$  зуба и преобразован в координатной системе шестерни  $X_{\partial} Y_{\partial} Z_{\partial}$ .

Углубленная расшифровка рассматриваемых технологических аспектов выбора материала и получения заготовки шестерни для последующей механической обработки и функционально-ориентированных технологических воздействий для обеспечения требований к материалу элементов и частей согласно КД приведена в таблице 1. В последней колонке табл. 1 приведен выбранный вариант технологии с указанием некоторых специфических особенностей формирования требований.

Совместное рассмотрение информации табл. 1 а также выражений 1 и схемы рекуррентного выбора вариантов согласно схем на рис. 3 с учетом критериальной оценки качества технологических воздействий (учитывая экономические показатели, систему информационного обеспечения и управления процессом проектирования) позволяет выбрать оптимальный вариант технологии формирования свойств материала детали.

**Заключение.**

В данной работе приведены результаты исследований, касающихся образования свойств материала деталей и ее частей и зон в машиностроительном цикле, достигаемых методами рекуррентного выбора функционально-ориентированных технологических воздействий инструментов на материал первоначально выбранного материала заготовки в процессах дополнительной обработки в различных средах,

инструментальным воздействием на материал, а также возможного применения аддитивных технологий.

Таблица 1.

Требования к материалу шестерни и к частям по КД		Суть свойств материала по обеспечению требований КД	Варианты технологических воздействий обеспечения свойств материала по КД		Примечание, выбранный вариант
Общее	Частное		Варианты технологий	особенности	
Образование и сохранение формы – поверхности (А,Б...П)		Сталь 20Х	Литье, штамповка, круглый прокат, отрезка	Механическая обработка заготовки согласно КД	Отрезка от круглого проката Ст20Х с припусками на обработку
	Поверхности шлицевого отверстия (группа П поверхностей)	Сталь 20Х	Наплавка, закалка, гальванопокрытие, напыление, эрозийная обработка цементация с t°-обработкой и мехобработкой	Режимы насыщения углеродом на заданную глубину и закалки	Нитроцементация с последующей t°-обработкой и мехобработкой, шлифование внутреннего диаметра
	Поверхности зубьев (группа К поверхностей каждого зуба шестерни)	Сталь 20Х	Наплавка, закалка, гальванопокрытие, напыление, цементация с t°-обработкой и мехобработкой	Режимы насыщения углеродом на заданную глубину и секторной закалки	Нитроцементация с последующей t°-обработкой микроструктура и твердость основного материала

В работе решены следующие частные задачи:

1. Установлены и формализованы эксплуатационные функции элементов, частей, макрозон, микрозон и зон с нанозонами деталей во взаимосвязи с требованиями к качественным показателям свойств материала, поверхностных и глубинных слоев деталей, заданных в КД.

2. Установлены возможности достижения требований к материалам по КД за счет функционально-ориентированных технологических воздействий, образующих свойства в локализованных зонах материала на всю глубину обрабатываемых элементов и частей деталей, и представлено все их многообразие в формализованном виде.

3. Созданы предпосылки для синтеза возможного множества схем формирования свойств материала путем ФОТ-воздействия на обрабатываемую деталь известным инструментом с учетом известных способов создания и корректировки свойств материала и использования дополнительных материальных физико-химических, газовых и иных сред, позволяющих достигать требуемых характеристик и формируемых свойств на всех глубинах деталей.

4. Установлена формализованная взаимосвязь требований КД на детали ко всем показателям качества материала обработанных частей и элементов детали, функционально значимым и заданных для конкретно локализованных участков детали в эксплуатации, и функционально-ориентированными технологическими воздействиями, осуществляемыми в составе технологических обрабатывающих

комплексов, реализующих механические, физические, химические и др. материальные принципы преобразования свойств материалов.

Показан пример использования изложенного материала для выбора способа формирования и обеспечения требований к частям и элементам ведущей шестерни КПП, работающей без разрыва потока передаваемой мощности.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Скворцов, В. Ф. Основы технологии машиностроения: учебное пособие. / В. Ф. Скворцов // Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2012. – 352 с.
2. Заблонский, К. И. Детали машин / К. И. Заблонский. – К.: Вища школа, 1985. – 518с.
3. Гордин, П. В. / Детали машин и основы конструирования. Пособие по курсовому проектированию / П.В. Гордин, Е. М. Росляков, В. И. Эвелеков. – Спб.: СЗТУ, 2005. – 113 с.
4. Михайлов, А. Н. Основы синтеза функционально-ориентированных технологий машиностроения / А. Н. Михайлов. – Донецк: ДонНТУ, 2009. – 346 с.
5. Базров, Б. М. Основы технологии машиностроения: Учебник для вузов / Б.М. Базров. – М.: Машиностроение, 2005. – 736 с.
6. Михайлов, А. Н. Проявление атрибутов деталей машин как факторов разработки функционально-ориентированных технологий / Михайлов А. Н., Котляров Б. С., Котляров В. Б., Котляров С. Б. // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. Международный сборник научных трудов – Донецк: ДонНТУ, 2020. – № 3(70). – С. 22-33.
7. Ивлев, Ю. В. Логика: учебник / Ю. В. Ивлев. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1992. – 270 с.
8. Довгалева, А. М. Совмещенная отделочно-упрочняющая обработка деталей машин вибродинамическим накатыванием и вращающимся магнитным полем / А. М. Довгалева // Государственное учреждение высшего профессионального образования «Белорусско-Российский университет» Журнал / Вестник Белорусско-Российского университета. – 2016. – №4 (53).
9. Котляров, В. Б. Предпосылки создания новой схемы механической зубчатой КПП с переключением без разрыва потока передаваемой мощности / Котляров В. Б., Котляров С. Б., Михайлов А. Н. // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. Международный сборник научных трудов. – Донецк: ДонНТУ, 2020. – №2 (69). – С. 50-62.
10. Тайц, Б.А. Производство зубчатых колес. Справочник. / Тайц Б.А. – 1990. – 464 с. – ISBN:5-217-00398-7.
11. Суслов, А. Г. Технологическое обеспечение и повышение эксплуатационных свойств деталей и их соединений / под общей ред. А. Г. Суслова., Федоров В. П., Горленко О. А. и др. – М.: Машиностроение, 2006. – 448 с.
12. Проектирование технологических процессов в машиностроении: учебное пособие для вузов / И. П. Филонов, Г. Я. Беляев, Л. М. Кожуро и др. – Мн.: УП «Технопринт», 2003. – 910 с.
13. Колесов, И. М. Основы технологии машиностроения: учебник для машиностроит. спец. Вузов / И.М. Колесов. – М.: Высш. шк., 2001. – 591 с.
14. Перспективные способы обработки материалов: учебное пособие. /А.И. Попелюх, А. Г. Тюрин, Н. В. Плотникова. – Челябинск, 2014. – 50 с.

Поступила в редколлегию 17.03.2021 г.



УДК 621.45.0.002.2(075.8)

<sup>1</sup>Д. А. Михайлов, канд. техн. наук, доц., <sup>2,3</sup>А. Н. Михайлов, д-р техн. наук, проф.,<sup>1</sup>А. А. Колодяжный, соискатель, <sup>1</sup>Е. А. Шейко, канд. техн. наук, доц.<sup>1</sup>Академия гражданской защиты, г. Донецк, ДНР,<sup>2</sup>Донецкий национальный технический университет, г. Донецк, ДНР<sup>3</sup>Донской государственной технической университет, г. Ростов-на-Дону, РоссияТел.: +38 (071) 3821135; E-mail: [mitia3@donapex.net](mailto:mitia3@donapex.net)

## НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНО-ОРИЕНТИРОВАННЫХ СВОЙСТВ СТРУКТУРЫ ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ И СВЯЗЕЙ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

*В статье рассмотрены особенности формирования функционально-ориентированных свойств структуры газотурбинного двигателя, а также создания связей параметров технологических процессов обеспечения этих свойств. При этом установлены принципы обеспечения функционально-ориентированных свойств структуре газотурбинного двигателя в условиях действия неравномерных эксплуатационных функций, характеризующихся неравномерностями R-родов. В работе показано, что для обеспечения функционально-ориентированных свойств множества структурных элементов газотурбинного двигателя необходимо связное множество параметров технологических процессов их обеспечения. Это множество параметров технологических процессов образует связный технологический континуум параметров обеспечения функционально-ориентированных свойств структуре газотурбинного двигателя.*

**Ключевые слова:** газотурбинный двигатель, структура, функционально-ориентированные свойства, связный технологический континуум параметров, технологический процесс.

D. A. Mikhaylov, A. N. Mikhaylov, A. A. Kolodyazhniy, E. A. Sheyko

## SOME FEATURES OF FORMATION OF FUNCTIONALLY-ORIENTED PROPERTIES OF THE STRUCTURE OF A GAS TURBINE ENGINE AND THE CONNECTIONS OF THE PARAMETERS OF THE TECHNOLOGICAL PROCESSES

*The article considers the features of the formation of functionally oriented properties of the structure of a gas turbine engine, as well as the creation of links between the parameters of technological processes to ensure these properties. At the same time, the principles of providing functionally oriented properties to the structure of a gas turbine engine under the conditions of the operation of uneven operational functions, characterized by irregularities of R-types, are established. The paper shows that to ensure the functionally oriented properties of a set of structural elements of a gas turbine engine, a coherent set of parameters of technological processes for their provision is necessary. This set of parameters of technological processes forms a coherent technological continuum of parameters for providing functionally oriented properties to the structure of a gas turbine engine.*

**Keywords:** a gas turbine engine, the structure, functionally oriented properties, connected continuum process parameters, technological process.

### Введение

В настоящее время газотурбинные двигатели (ГТД) (рис. 1) широко используются в авиации как высокоэффективные источники движения [1, 2, 3]. Они особенно широко применяются для современных самолетов [2, 3] и вертолетов [1, 3]. Вместе с тем, ГТД представляют собой сложную систему, имеющую множество различных деталей, групп деталей, узлов и подсистем, которые обуславливают эксплуатационные особенности и возможности этих авиационных двигателей.

Совершенствование и перспективное развитие ГТД происходит в различных

направлениях [1, 2]. Здесь, можно отметить следующие основные направления: улучшение термодинамических параметров, схемных и структурно-компоновочных решений; повышение показателей эффективности использования силовой установки; совершенствование связей силовой установки с бортом летательного аппарата; повышение эксплуатационных и технических свойств структуры авиационного двигателя; решение вопросов дизайна, эстетики, эргономики, экологии и конъюнктуры рынка продаж ГТД. Эти и другие направления перспективны и активно развиваются.



Рисунок 1. Общий вид ГТД модели ТВ3-117.

В данной работе рассматриваются вопросы повышения эксплуатационных свойств ГТД за счет обеспечения структуре ГТД функционально-ориентированных свойств (ФОС) [4]. Необходимость применения ФОС структуре ГТД обусловлена тем, что его структура состоит из множества деталей (элементов), структура иерархична (рис. 2) и на элементы структуры ГТД действуют неравномерные эксплуатационные воздействия, а именно, абразивно-эрозионные, температурные, химические, физические и другие воздействия. Эти неравномерные воздействия приводят к неравномерным и неодинаковым износам и разрушениям элементов структуры ГТД, что снижает технико-экономические параметры эксплуатации.

Для повышения эксплуатационных свойств [5] и технико-экономических показателей ГТД целесообразно применение ФОС [4] элементов структуры ГТД, которые позволяют компенсировать действие неравномерных износов и разрушений в процессе эксплуатации авиационного двигателя [6]. При этом для обеспечения ФОС иерархической структуры ГТД необходимы специальные технологии, которые бы позволяли ре-

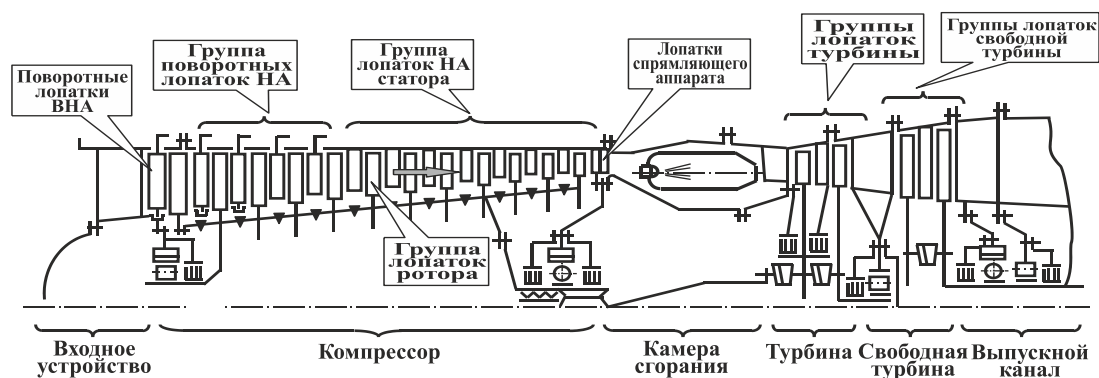


Рисунок 2. Схема вертолетного ГТД модели ТВ3-117 с указанием групп лопаток турбокомпрессора.

шать вопросы обеспечения ФОС отдельным деталям, множеству деталей, группам деталей и подсистемам ГТД на базе определенных связей и закономерностей. Эти вопросы рассматриваются в этой работе.

Целью данной работы является разработка методов формирования ФОС структуры ГТД на основе определения связей параметров технологических процессов и эксплуатационных свойств.

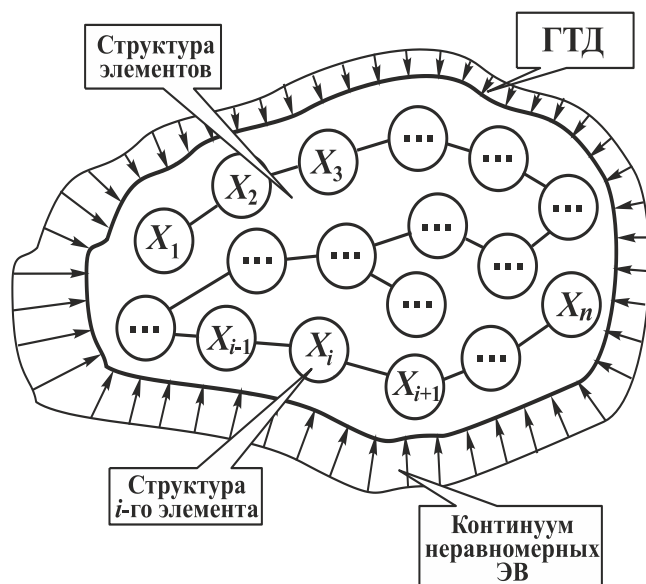
В соответствии с поставленной целью в данной работе определены следующие задачи: выполнить анализ структуры и основных особенностей эксплуатации ГТД;

предложить общий подход обеспечения ФОС структуры ГТД в зависимости от эксплуатационных его свойств; установить особенности реализации ФОС на основе обеспечения связей технологических параметров для структурных элементов ГТД.

Эти задачи решаются в данной работе.

### 1. Структура и основные особенности эксплуатации ГТД.

Можно отметить, что ГТД представляет собой сложную систему, которая имеет заданную структуру (рис. 3). Структуру ГТД можно представить следующим выражением:



нием:

$$Str = Str\{X, A\},$$

$Str$  - структура элементов ГТД;

$X$  - множество структурных элементов ГТД;

$A$  - множество связей (отношений) на множестве структурных элементов  $X$ .

Здесь:

$$X = \{X_1, X_2, \dots, X_i, \dots, X_n\};$$

$$A = \{A_1, A_2, \dots, A_j, \dots, A_m\},$$

где  $X_i$  -  $i$ -й структурный элемент множества  $X$ ;

$A_i - j$ -е отношение (связь) между структурными элементами  $X$  на множестве  $A$ ;

$n$  - мощность множества  $X$ ;

Рисунок 3. Гипотетическая схема структуры ГТД и действия неравномерных эксплуатационных функций.

$m$  - мощность множества  $A$ .

На рис. 3 представлена гипотетическая схема структуры ГТД и действия неравномерных эксплуатационных функций. Здесь показаны структурные элементы ГТД, связи и континуум неравномерных эксплуатационных функций (ЭФ).

Учитывая особенности структурирования элементов ГТД, представленную в работах [6, 7], иерархическую структуру ГТД можно представить следующим образом:

- структура 1-го уровня;
- структура 2-го уровня;
- структура 3-го уровня;
- структура 4-го уровня;
- структура 5-го уровня;
- структура 6-го уровня;
- структура 7-го уровня.

При эксплуатации ГТД на его иерархическую структуру действуют неравномерные эксплуатационные воздействия (ЭВ) 7-ми родов, которые приводят к неравномерному износу и разрушению этой структуры. На основании этого структуру износа элементов ГТД можно представить следующим выражением:

$$Str_1 = Str\{F, \gamma\},$$

где  $Str_1$  - структура износа ГТД;

$F$  – множество ЭВ (особенностей износа) структурных элементов ГТД;

$\gamma$  – множество отношений (связей) на множестве  $F$ .

Здесь: 
$$F = \{F_1, F_2, \dots, F_i, \dots, F_n\};$$

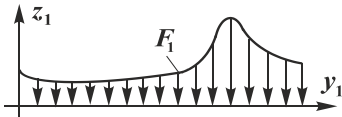
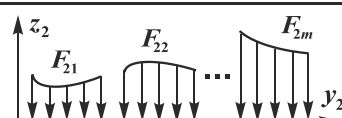

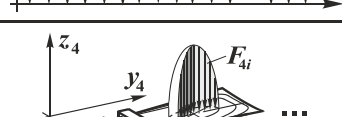
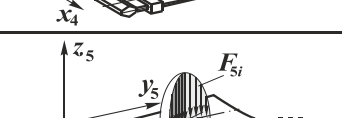
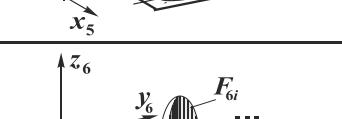
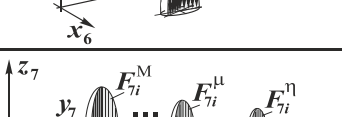
$$\gamma = \{\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_j, \dots, \gamma_m\},$$

где  $F_i$  –  $i$ -й структурный элемент множества  $F$ ;

$\gamma_j$  –  $j$ -е отношение (связь) между структурными элементами множества  $F$ ;

$m$  – мощность множества  $\gamma$ .

Таблица 1. Особенности структуры и действия неравномерных эксплуатационных функций по элементам ГТД

Неравномерность абразивно-эрозионного износа структуры	Гипотетическая схема действия эксплуатационных функций	Элементы структуры ГТД
Неравномерность 1-го рода		Система ГТД
Неравномерность 2-го рода		Подсистемы
Неравномерность 3-го рода		Группы
Неравномерность 4-го рода		Детали
Неравномерность 5-го рода		<u>Элементы:</u> точка, линия, поверхность, объем
Неравномерность 6-го рода		Зоны
Неравномерность 7-го рода		Макро-, микро-, нанозоны

Следует отметить, что при эксплуатации ГТД на его структуру действуют неравномерные ЭВ, которые вызывают неравномерные износы элементов. Поэтому в соответствии со структурой ГТД иерархическая структура износа его элементов будет иметь следующие составляющие [6]:

- неравномерный износ 1-го рода;
- неравномерный износ 2-го рода;
- неравномерный износ 3-го рода;
- неравномерный износ 4-го рода;
- неравномерный износ 5-го рода;
- неравномерный износ 6-го рода;
- неравномерный износ 7-го рода.

В табл. 1 представлены особенности структуры и действия неравномерных эксплуатационных функций по элементам ГТД. Здесь показаны рода неравномерностей дей-

ствия абразивно-эрозионного износа структуры, гипотетические схемы действия эксплуатационных функций и элементы структуры ГТД,

Возникающий неравномерный износ иерархической структуры ГТД приводит к снижению технико-экономических показателей ГТД, неполному использованию потенциальных возможностей его деталей и уменьшению возможностей дальнейшего повышения ресурса и его эксплуатационных свойств. Для решения этих вопросов необхо-

димо на всех иерархических уровнях их износа обеспечивать структуре (структурных элементов) ГТД ФОС [7].

На рис. 4 показан граф системы ГТД действия неравномерных эксплуатационных воздействий (ЭВ) и формирования ФОС по уровням его структуры (КЭВ – конти

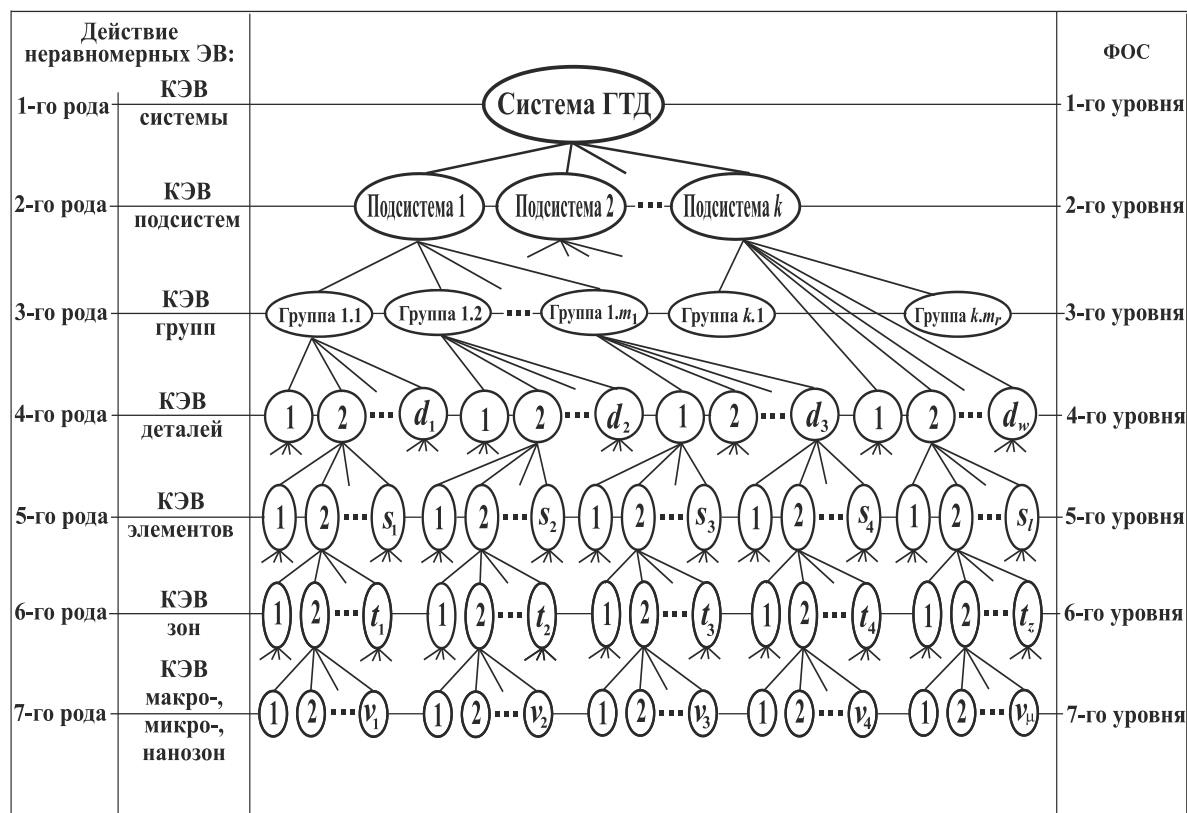
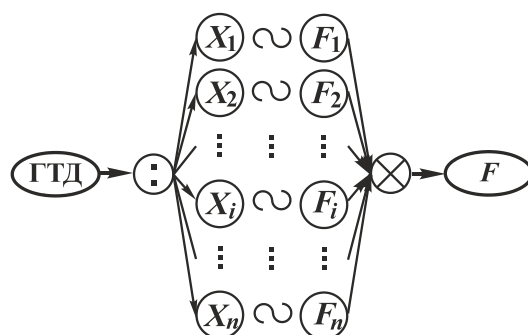


Рисунок 4. Граф системы ГТД действия неравномерных эксплуатационных воздействий (ЭВ) и формирования ФОС по уровням его структуры (КЭВ – континуум эксплуатационных воздействий).

нуум эксплуатационных воздействий). Можно отметить, что на каждом уровне иерархической структуры элементов ГТД действует континуум эксплуатационных воздействий (КЭВ) соответствующий данному роду неравномерных ЭВ. При этом на каждое множество элементов структуры действует заданное ЭВ. В этом случае, эти особенности можно представить следующим выражением:



где  $\odot$  - знак декомпозиции структурных элементов ГТД;

∞ - знак бинарного соответствия структурных элементов ГТД и действия эксплуатационных функций;

⊗ - знак композиции элементарных функций эксплуатационного континуума.

## 2. Особенности обеспечения ФОС структуры ГТД

ФОС структуры ГТД позволяют решать вопросы:

- обеспечения качественно новой совокупности свойств ГТД;
- обеспечения заданных, требуемых или предельных эксплуатационных свойств

ГТД;

- установления закономерностей эксплуатационных свойств ГТД в зависимости от производственно-технических свойств структуры ГТД;

- управления эксплуатационными свойствами ГТД в процессе изготовления;

- повышения технико-экономических показателей ГТД.

Под качеством изделий машиностроения понимается совокупность свойств, обуславливающих их пригодность выполнять свое функциональное назначение в заданном диапазоне изменения условий эксплуатации. Для оценки качества машин применяют единичные и комплексные показатели [5].

Наибольшее применение в машиностроении получили единичные показатели, которые подразделяют на эксплуатационные и производственно-технические [5].

К группе эксплуатационных показателей свойств относят показатели назначения, надежности, эргономики и эстетики [5]. К группе производственно-технических показателей можно отнести физико-механические свойства, технологичность, технологическую наследственность, точность, показатели шероховатости поверхности и другие показатели.

Следует отметить, что надежность является комплексным свойством, которая в зависимости от назначения объекта и условий его применения может включать безотказность, долговечность, ремонтпригодность и сохраняемость или определенные сочетания этих свойств. При этом показателями долговечности является ресурс, гамма-процентный ресурс, средний срок службы, срок службы до списания и другие параметры [5]. Для ГТД, наряду со всеми представленными выше параметрами качества изделий, важнейшим эксплуатационным параметром является ресурс авиационного двигателя.

В целом, эксплуатационные свойства ГТД можно представить следующим вектором:

$$C^{\vartheta} = \left\{ \begin{array}{c} C_1^{\vartheta} \\ C_2^{\vartheta} \\ C_3^{\vartheta} \\ \dots \\ C_K^{\vartheta} \end{array} \right\}, \quad (1)$$

где  $C^{\vartheta}$  - вектор эксплуатационных свойств;

$C_k^{\vartheta}$  -  $k$ -й элемент вектора  $C^{\vartheta}$ .

$K$  – общее количество свойств.

Можно отметить, что в случае обеспечения ФОС структуре ГТД в условиях действия неравномерных эксплуатационных функций, эксплуатационные свойства (безотказность, долговечность, ремонтпригодность, сохраняемость, ресурс и тому подобное)



элементов этой структуры должны быть равными или одинаковыми, они могут быть кратными в случае замены отказавших элементов запасными, или функционально-зависимыми. При обеспечении свойств ГТД одной из важнейших характеристик авиационного двигателя является его ресурс  $C_k^o = R_k$ . В этом случае, ресурс элементов структуры ГТД можно представлять следующими выражениями [6, 7]:

- при обеспечении равного ресурса элементов структуры

$$R_1 = R_2 = R_3 = \dots = R_i = \dots = R_n = R ; \tag{2}$$

- при обеспечении кратного ресурса элементов структуры

$$k_1 R_1 = k_2 R_2 = k_3 R_3 = \dots = k_i R_i = \dots = k_n R_n = R ; \tag{3}$$

- при обеспечении функционально-зависимого ресурса элементов структуры

$$\left. \begin{aligned} R_1 &= f_1(R) ; \\ R_2 &= f_2(R) ; \\ R_3 &= f_3(R) ; \\ \dots &\dots \dots \dots \\ R_i &= f_i(R) ; \\ \dots &\dots \dots \dots \\ R_n &= f_n(R) , \end{aligned} \right\} \tag{4}$$

где  $R$  – общий ресурс ГТД;

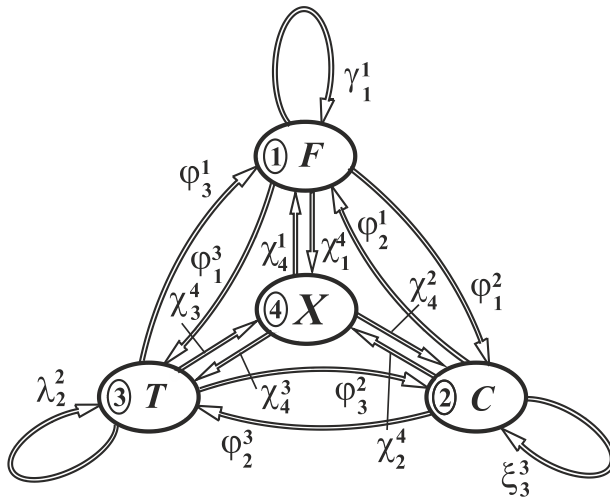


Рисунок 5. Схема связей между составляющими системы формирования ФОС структурных элементов ГТД.

$R_i$  – ресурс  $i$ -го структурного элемента ГТД;

$k_i$  – коэффициент кратности (определяет количество замен структурного элемента ГТД);

$f_i(R)$  – функциональная зависимость ресурса  $i$ -го структурного элемента ГТД.

Для ГТД можно выделить следующие свойства (рис. 5):

- эксплуатационные свойства  $F$ ;
- технические (физико-механические) свойства  $C$ , в том числе ФОС;
- производственные (технологические) свойства  $T$ .

В этом случае, можно записать следующее выражение:

$$F \sim C \sim T ,$$

где  $\sim$  - знак бинарного соответствия свойств.

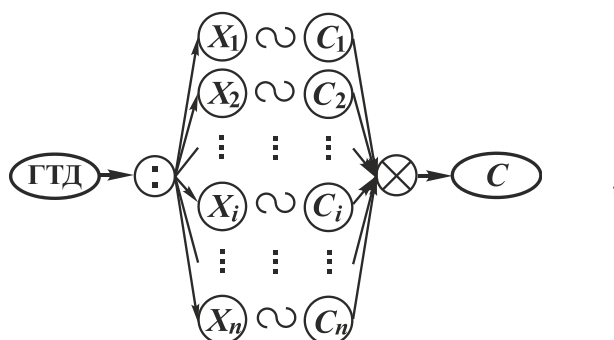
В этом случае можно отметить, что в условиях действия неравномерных эксплуатационных функций на элементы иерархической структуры ГТД необходимо обеспечивать равные, кратные или функционально-ориентированные эксплуатационные параметры для всех элементов ГТД, а именно: надежность, долговечность, ресурс или



другие параметры. В этих условиях это достигается только посредством применения ФОС структурных элементов ГТД. При этом эксплуатационные свойства, ФОС и технологические параметры связаны между собой связями (рис. 5) на базе определенных закономерностей, например, по износу материала, параметрам обеспечения физико-механических свойств и равному ресурсу эксплуатации элемента ГТД.

На рис. 5 представлена схема связей между составляющими системы формирования ФОС структурных элементов ГТД. Здесь, показаны следующие составляющие: 1 – эксплуатационные функции (свойства)  $F$ ; 2 - технические (физико-механические) свойства  $C$ , в том числе ФОС; 3 - производственные (технологические) свойства  $T$ ; 4 – структурные элементы системы ГТД. Буквами  $\varphi_i^j, \chi_i^j, \gamma_i^j, \xi_i^j, \lambda_i^j$  - обозначены прямые и  $\varphi_j^i, \chi_j^i, \gamma_j^i, \xi_j^i, \lambda_j^i$  - обратные связи между соответствующими составляющими схемы рис. 5.

Заметим, что в соответствии с рис. 5 между структурой  $X$  ГТД и его техническими свойствами  $C$  (ФОС) действуют связи, которые можно представить с помощью бинарного соответствия параметров:



где  $X_i$  –  $i$ -й элемент структуры ГТД;  
 $C_i$  -  $i$ -е свойство элемента структуры.

Можно отметить, что обеспечение ФОС структуры необходимо выполнять по всем иерархическим уровням структуры ГТД. В этом случае ФОС структуры будет следующих уровней:

- ФОС 1-го уровня;
- ФОС 2-го уровня;
- ФОС 3-го уровня;
- ФОС 4-го уровня;
- ФОС 5-го уровня;
- ФОС 6-го уровня;
- ФОС 7-го уровня.

В этом случае, ФОС каждого уровня структуры связаны между собой, то есть их параметры зависимы (рис. 6). А именно, ФОС (технические свойства – физико-механические свойства) каждого структурного элемента  $C_i$  определяются в зависимости от действия эксплуатационных функций, при этом ФОС соседних элементов структуры связаны между собой через особенности действия неравномерностей их износа. При этом ФОС обеспечиваются из условия того, что эксплуатационные свойства всех элементов  $F$  равны, кратны или функционально зависимы, параметры которых определяются в соответствии с выражениями (1), (2), (3) и (4) [7].

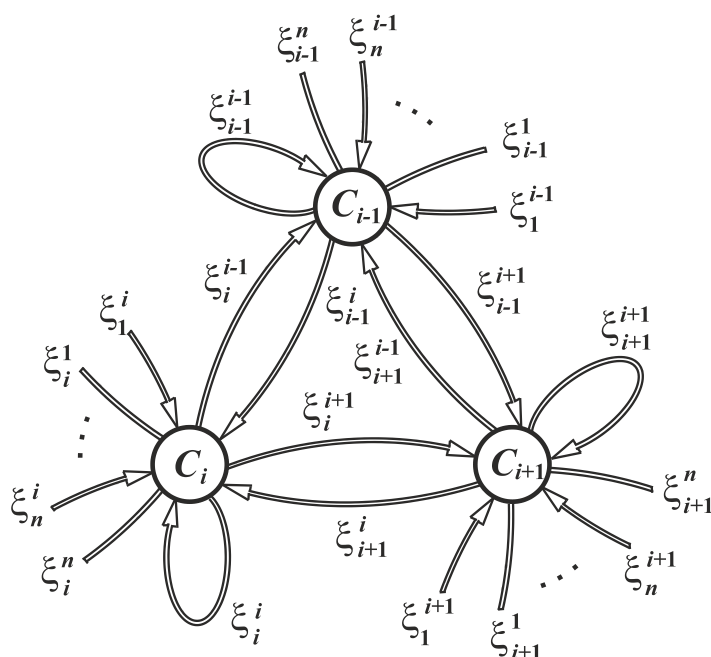


Рисунок 6. Континуум ФОС структурных элементов ГТД и схема связей его соседних элементов.

$\xi$  – множество связей (отношений) на множестве  $C$ .

Здесь:

$$C = \{C_1, C_2, \dots, C_i, \dots, C_n\};$$

$$\xi = \{\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_j, \dots, \xi_m\},$$

где  $C_i$  –  $i$ -й структурный элемент множества  $C$ ;

$\xi_j$  –  $j$ -е отношение (связь) между структурными элементами множества  $C$ ;

$m$  – мощность множества  $\xi$ .

Следует отметить, что реализация ФОС структурных элементов ГТД должна выполняться на базе группы особых принципов ориентации эксплуатационных функций  $F$ , свойств (ФОС)  $C$  и технологических параметров  $T$  [4]:

1. Принцип функциональной ориентации.
2. Принцип топологической ориентации.
3. Принцип количественной ориентации.
4. Принцип структурной ориентации и других принципов.

В качестве примера на рис. 7 представлена схема реализации принципа функциональной ориентации эксплуатационных функций  $F$ , свойств  $C$  (ФОС) и технологических воздействий  $T$  [4]. Между составляющими схемы (рис. 7) действуют связи  $\lambda_i^j$ , которые определяют закономерности отношений, с помощью которых выполняется ориентация физико-механических свойств элементов в зависимости от особенностей их эксплуатации на базе обеспечения заданных технологических воздействий.

Можно отметить, что кроме приведенных принципов формирования изменяющихся свойств в условиях действия неодинаковых и не равномерных эксплуатационных функций (износ, разрушения), процесс обеспечения ФОС следует выполнять на базе следующих дополнительных принципов:

На рис. 6 показана схема континуума ФОС структурных элементов ГТД и схема связей их соседних элементов. Здесь показано:  $C_i, C_{i-1}, C_{i+1}$  – ФОС соседних элементов ГТД;  $\xi_i^j$  – связь между  $i$ -м и  $j$ -м элементами;  $\xi_j^i$  – связь между  $j$ -м и  $i$ -м элементами;  $n$  – мощность множества  $C$  на каждом уровне обеспечения ФОС структуре ГТД.

В целом, ФОС структуры ГТД можно представить следующим образом:

$$Str_2 = Str\{C, \xi\},$$

где  $Str_2$  – структура ФОС ГТД;

$C$  – множество ФОС структурных элементов ГТД;

1. Обеспечения равных, кратных или функционально зависимых эксплуатационных свойств (надежность, долговечность, ресурс и другие единичные эксплуатационные свойства) по всем элементам каждого уровня структуры ГТД.

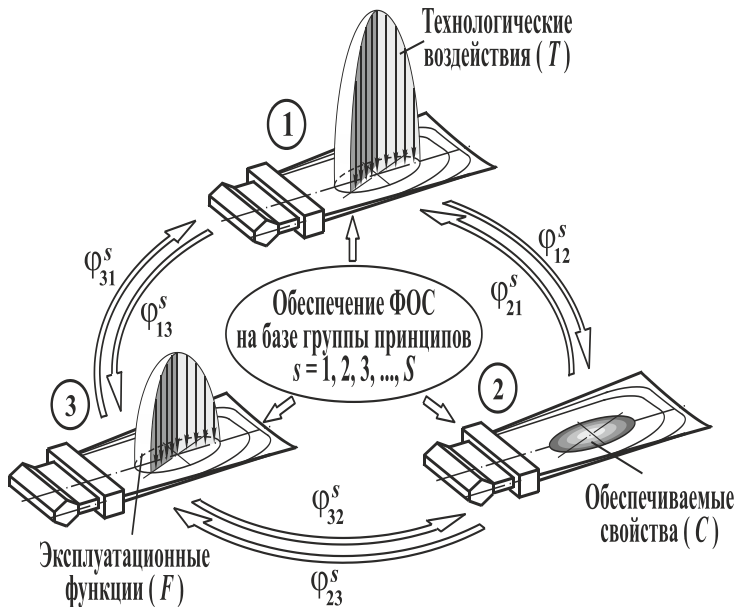


Рисунок 7. Схема реализации принципа функциональной ориентации эксплуатационных функций  $F$ , свойств  $C$  (ФОС) и технологических воздействий  $T$ .

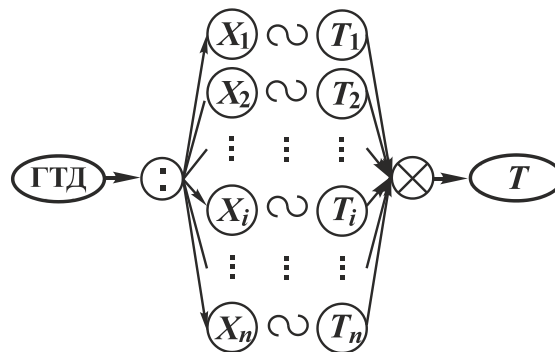
2. Обеспечения равных, кратных или функционально зависимых эксплуатационных свойств (надежность, долговечность, ресурс и другие единичные эксплуатационные свойства) по всем уровням иерархической структуры ГТД.

3. Последовательного распределения изменяющихся ФОС (технические свойства – физико-механические свойства) по всем элементам каждого уровня структуры ГТД, с началом от элемента, на котором действует максимальная интенсивность его износа или разрушения, затем по другим элементам в зависимости от степени уменьшения действия параметров эксплуатационных

воздействий.

4. Последовательного распределения изменяющихся ФОС (технические свойства – физико-механические свойства) по всем уровням структуры ГТД, с началом от уровня, на котором действует максимальная интенсивность износа или разрушения элементов, затем по другим уровням в зависимости от степени уменьшения действия параметров эксплуатационных воздействий.

Обеспечение ФОС структуре ГТД выполняется посредством технологии, которая должна реализовываться на базе отношений бинарного соответствия между элементами структуры  $X$  и необходимыми параметрами технологических воздействий (рис. 5):



Таким образом, на основании приведенных особенностей, принципов ориентации свойств и дополнительных принципов - формируются ФОС по структурным эле-

ментам и уровням иерархической структуры ГТД в соответствии с заданными закономерностями действия эксплуатационных функций и связей свойств. При этом для обеспечения ФОС иерархической структуры элементов ГТД необходима специальная технология.

### 3. Связный технологический континуум параметров обеспечения ФОС структуры ГТД

Для реализации ФОС структуры ГТД, состоящего из множества элементов (рис. 3), необходимо множество технологических процессов. При этом для обеспечения ФОС требуется реализация связей параметров на этом множестве [7, 8]. В связи с этим, технологию обеспечения ФОС следует формировать на базе структуры комплексного многосвязного технологического процесса (КМТП) на множестве  $T$  технологических процессов, который можно записать следующим образом:

$$Str_3 = Str\{T, D\},$$

где  $Str_3$  - структура технологического континуума для обеспечения ФОС ГТД;

$T$  – множество технологических процессов для обеспечения ФОС структуре ГТД;

$D$  – множество связей (отношений) на множестве  $T$ .

Здесь:

$$T = \{T_1, T_2, \dots, T_i, \dots, T_n\};$$

$$D = \{D_1, D_2, \dots, D_j, \dots, D_m\},$$

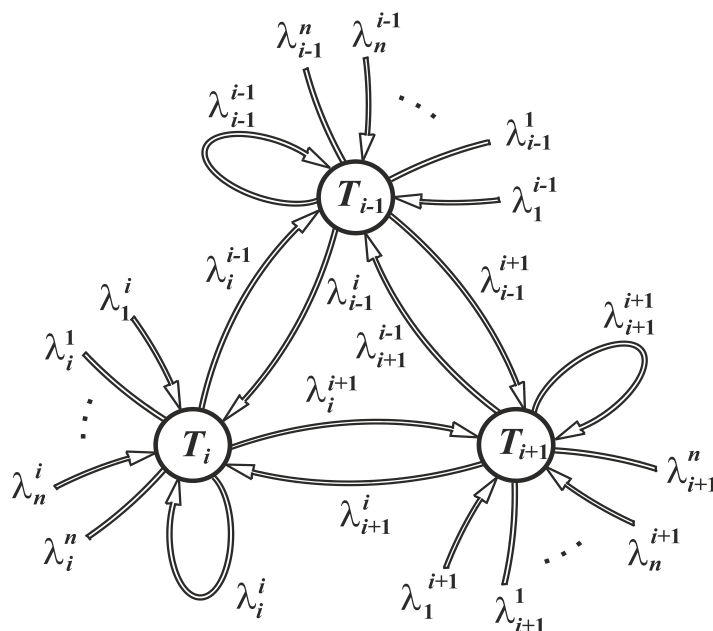


Рисунок 8. Многосвязный технологический континуум для обеспечения ФОС структурных элементов ГТД и схема связей его соседних элементов.

где  $T_i$  –  $i$ -й структурный элемент множества  $T$ ;

$D_i - j$ -е отношение (связь) между структурными элементами на множестве  $T$ .

На рис. 8 показана схема многосвязного технологического континуума для обеспечения ФОС структурных элементов ГТД и связей его соседних элементов. Здесь, показано:  $T_i, T_{i-1}, T_{i+1}$  - технологические процессы (параметры) соседних элементов ГТД;  $\lambda_i^j$  - связь между  $i$ -м и  $j$ -м элементами;  $\lambda_j^i$  - связь между  $j$ -м и  $i$ -м элементами;  $n$  – мощность множества  $T$  на каждом уровне обеспечения технологических воздействий по структуре ГТД.

Можно отметить, что для обеспечения ФОС структуры необходимо реализация множества технологических процессов по всем иерархическим уровням структуры ГТД. В этом случае, технологический континуум структуры по иерархическим уровням можно представить следующим образом [8, 9]:

- технологии для обеспечения ФОС 1-го уровня;
- технологии для обеспечения ФОС 2-го уровня;
- технологии для обеспечения ФОС 3-го уровня;
- технологии для обеспечения ФОС 4-го уровня;
- технологии для обеспечения ФОС 5-го уровня;
- технологии для обеспечения ФОС 6-го уровня;
- технологии для обеспечения ФОС 7-го уровня.

В работах [8, 9, 10, 11] разработан общий подход синтеза комплексного много-связного технологического процесса обеспечения ФОС элементам ГТД. В данной работе приводятся данные об особенностях обеспечения ФОС всей структуре ГТД. Здесь, можно отметить, что комплексный многосвязный технологический процесс обеспечения ФОС структуре ГТД должен строится на базе следующего условия.

Технологические особенности обеспечения заданных, требуемых или предельных эксплуатационных свойств (наджность, долговечность, ресурс, стойкость и тому подобные критерии) множества структурных элементов ГТД с ФОС (изменяющиеся во времени и/или в пространстве геометрические и/или физико-механические свойства), работающих в условиях действия неравномерных эксплуатационных воздействий  $R$ -родов, заключаются в том, что формирование равных, кратных или функционально-зависимых параметров ФОС на подмножествах элементов  $1, 2, 3, \dots, i_r, \dots, n_r$  каждого уровня  $r$  на множестве уровней  $1, 2, 3, \dots, r, \dots, R$  структуры, выполняется в зависимости от их эксплуатационных свойств, а именно, последовательно обеспечиваются по структурным элементам каждого уровня, начиная, сначала с элемента и уровня, на которых происходит максимальный износ и/или разрушение при эксплуатационных воздействиях, затем, по другим элементам данного уровня, в зависимости от изменения параметров эксплуатационных воздействий и физико-механических свойств первого элемента, далее, аналогично выполняется обеспечение свойств элементов по другим уровням. В этом случае ФОС формируются на базе следующих выражений:

$$\left. \begin{aligned} C_1^r &= f_1(F_1^r = F_{\max}); \\ C_2^r &= f_2(C_1^r, F_2^r); \\ C_3^r &= f_3(C_1^r, F_3^r); \\ &\dots\dots\dots; \\ C_i^r &= f_i(C_1^r, F_i^r); \\ &\dots\dots\dots; \\ C_n^r &= f_n(C_1^r, F_n^r), \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

где  $C_1^r, C_2^r, C_3^r, \dots, C_i^r, \dots, C_n^r$  - множество физико-механических свойств соответствующего элемента структуры ГТД на уровне  $r$ ;

$F_1^r, F_2^r, F_3^r, \dots, F_i^r, \dots, F_n^r$  - множество эксплуатационных функций действующих на соответствующий элемент структуры ГТД на уровне  $r$ ;

$C_i^r = f_i(C_1^r, F_i^r)$  - функциональная зависимость физико-механических свойств  $i$ -го элемента  $r$ -го уровня структуры ГТД от свойств и эксплуатационных воздействий на первый элемент структуры.

На базе первой зависимости выражения (5) и ФОС ГТД можно формировать заданные, требуемые или предельные его свойства, а также управлять его параметрами в процессе реализации комплексного многосвязного технологического процесса обеспечения ФОС. В этом случае, при распределении ФОС по элементам, первым элементом будет тот, на который действует максимальные эксплуатационные воздействия  $F_{max}$ . При этом свойства всех элементов структуры находятся в функциональной зависимости от первого элемента и особенностей действия эксплуатационных воздействий. Следует иметь в виду, что физико-механические свойства первого элемента могут быть заданными, требуемыми или предельными, далее идет распределение свойств по элемен-

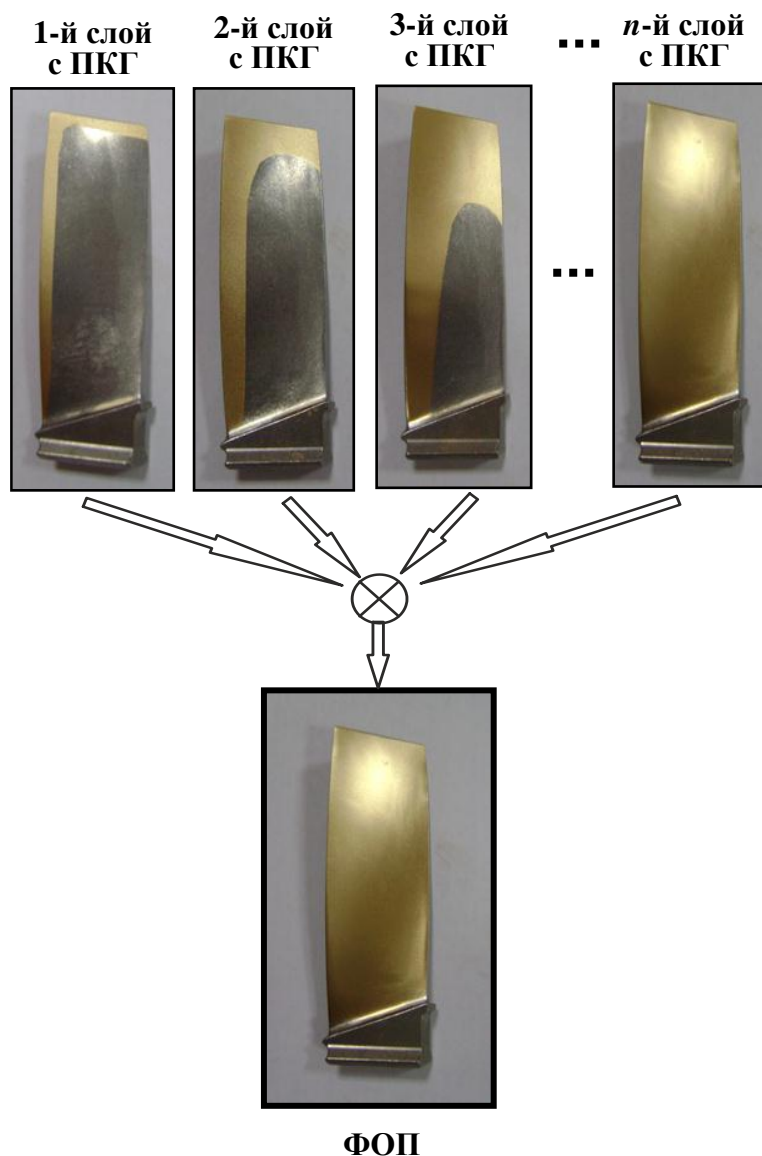


Рисунок 9. Схема композиции многослойного ФОП лопатки компрессора, состоящего из  $n$  слоев с ПКГ каждого.

что ФОП с ПКГ позволяет формировать многослойное покрытие лопатки изменяющейся толщины из слоев равной толщины. В этом случае, толщина покрытия больше в зо-

нам каждого уровня и по уровням иерархической структуры ГТД. Это позволяет управлять физико-механическими свойствами структуры ГТД на этапе реализации технологии обеспечения ФОС. Определив свойства первого элемента на основании выражения (5) формируются все ФОС структуры ГТД.

Таким образом, приведенные особенности формирования свойств (5) структуре ГТД позволяют обеспечивать необходимые ФОС элементов, а приведенные связи (рис. 8) определяют технологические параметры этих свойств в зависимости от особенностей эксплуатации элементов структуры.

В качестве примера обеспечения ФОС на рис. 9 приведена схема композиции многослойного функционально-ориентированного покрытия (ФОП) лопатки компрессора, состоящего из  $n$  слоев с пространственным контуром границ (ПКГ) каждого [12].

Можно отметить,

нах интенсивного износа, а именно на входной и периферийной кромках, толщина покрытия меньше в зонах, где действует меньший абразивно-эрозионный износ. При этом общая толщина ФОП определяется интенсивностью износа опытного покрытия [12]. В данном случае, многослойное ФОП формируется на основе слоев нитрид титанового покрытия, образуемого на базе вакуумных дуговых покрытий.

На рис. 12 представлена схема композиции многослойного ФОП состоящего из  $n$  слоев для 5-го уровня обеспечения ФОС. Каждый слой ФОП имеет ПКГ, геометрические параметры которого определяются на базе абразивно-эрозионного износа опытного однослойного покрытия в ГТД [12] при эксплуатации.

Основные особенности разработанного многослойного ФОП [12] является то, что данное покрытие защищает (консервирует) основной материал лопатки на период гарантированного ресурса ГТД. При этом в конце этого ресурса происходит полный износ покрытия (единовременно) без износа основного материала, что позволяет повторно наносить ФОП и повышать ресурс лопаток в целом. Далее, на основании связей рис. 8, выражения (2) и (5) выполняется согласование параметров свойств по группам лопаток, между группами лопаток и так далее.

ФОП лопаток ГТД (рис. 9) обеспечивает следующее:

- повышается ресурс лопаток;
- повышается ремонтпригодность лопаток;
- обеспечивается заданный, требуемый или предельный ресурс лопаток;
- повышается эксплуатационный потенциал лопаток;
- повышаются технико-экономические показатели эксплуатации лопаток ГТД.

Таким образом, представленные особенности и принципы реализации комплексного многосвязного технологического процесса для множества элементов структуры ГТД позволяют формировать ФОС по элементам каждого уровня и по уровням иерархической структуры на базе множества связанных технологических процессов.

### **Заключение**

В представленной работе выполнена разработка технологического подхода формирования ФОС структуры ГТД на основе определения связей параметров технологических процессов и эксплуатационных свойств. Этот подход базируется на множестве связанных технологических процессов, последовательно обеспечивающих формирование ФОС иерархической структуры ГТД, работающего в условиях действия неравномерных эксплуатационных функций. При этом связи параметров технологических процессов позволяют обеспечивать равные, кратные или функционально-зависимые эксплуатационные свойства (надежность, долговечность, ресурс, ремонтпригодность и другие параметры) в зависимости от параметров технических свойств элементов (физико-механические свойства), а именно ФОС структуры ГТД. Решение этих вопросов базируется на следующем:

- на определении особенностей эксплуатации структуры ГТД;
- на формировании ФОС структуры ГТД из условия обеспечения равных, кратных или функционально зависимых эксплуатационных свойств всех элементов;
- на обеспечении связей параметров структуры комплексного многосвязного технологического процесса обеспечения ФОС иерархической структуры ГТД.

### **ЛИТЕРАТУРА:**

1. Григорьев, В. А. Вертолетные газотурбинные двигатели. / В. А. Григорьев [и др.]. – М.: Машиностроение, 2007. – 491 с.



2. Демин, Ф. И. Технология изготовления основных деталей газотурбинных двигателей / Ф. И. Демин, Н. Д. Проничев, И. Л. Шитарев. – М.: Машиностроение, 2002. – 328 с.
3. Богуслаев, В. А. Отделочно-упрочняющая обработка деталей ГТД. / В. А. Богуслаев, В. К. Яценко, П. Д. Жеманюк и [др.]. – Запорожье: Мотор Сич, 2005. – 559 с.
4. Михайлов, А. Н. Основы синтеза функционально-ориентированных технологий машиностроения. – Донецк: ДонНТУ, 2009. – 346 с.
5. Суслов, А. Г. Технология машиностроения: Учебник для студентов машиностроительных специальностей вузов. – М.: Машиностроение, 2004. – 400 с.
6. Михайлов, Д. А. Основные особенности эксплуатации лопаток компрессора ГТД и классификация их эксплуатационных функций / Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научных трудов. – Донецк: ДонНТУ, 2015. – № 4 (50). – С. 126-131.
7. Михайлов, Д. А. Общий подход в обеспечении функционально-ориентированных свойств лопаток компрессора ГТД на базе принципа одновременного полного износа покрытия / Д. А. Михайлов, А. В. Хандожко, Е. А. Шейко, А. Н. Михайлов // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научных трудов. – Донецк: ДонНТУ, 2015. – № 4 (50). – С. 132-139.
8. Михайлов, А. Н. Структурный синтез комплексного многосвязного технологического процесса обработки лопаток компрессора газотурбинных двигателей с функционально-ориентированными покрытиями / А. Н. Михайлов, Д. А. Михайлов, Е. А. Шейко, В. А. Михайлов // Научно-технические технологии в машиностроении. – Брянск: БГТУ, 2020. – № 1(103). – С. 40-48. – <https://doi.org/10.30987/2223-4608-2020-2020-1-40-48>.
9. Михайлов, Д. А. Общий подход синтеза комплексного многосвязного технологического процесса обеспечения функционально-ориентированных свойств газотурбинных двигателей / Д. А. Михайлов, Е. А. Шейко, В. А. Михайлов, А. Н. Михайлов // Машиностроение и техносфера XXI века: Сб. трудов XXVII международной научно-техн. конференции в г. Севастополе 14-20 сентября 2020 г. – Донецк: ДонНТУ, 2020. – С. 235-253.
10. Михайлов, А. Н. Методика направленного поиска рациональных структурных вариантов процессов обработки лопаток ГТУ с учетом технологических связей / А. Н. Михайлов, А. П. Пичко, Д. А. Михайлов и [др.] // Машиностроение и техносфера XXI века: Сборник трудов XXVI международной научно-технической конференции в г. Севастополе 23-29 сентября 2019 г. – Донецк: ДонНТУ, 2019. – С. 311-317.
11. Михайлов, Д. А. Общая методология синтеза комплексного многосвязного технологического процесса обеспечения функционально-ориентированных свойств газотурбинного двигателя. / Д. А. Михайлов. // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научных трудов. – Донецк: ДонНТУ, 2021. – № 1(72). – С. 40-57.
12. Патент 2718877 РФ, С23С 14/04. Способ нанесения функционально-ориентированного износостойкого покрытия на лопатку газотурбинного двигателя / А. Н. Михайлов, Д. А. Михайлов, В. А. Михайлов, Е. А. Шейко, А. П. Пичко, Н. С. Пичко, В. И. Сухарев. – заявл. № 2018107164 от 26.02.2018; опубл.15.04.2020, Бюл. № 11. – 7 с.

Поступила в редколлегию 12.03.2021 г.

УДК 621.89:532.13:544.773

**Е. В. Овчинников**, д-р техн. наук, проф.

Гродненский государственный университет им. Янки Купалы, Беларусь

Тел./Факс: +375 (152) 684108; E-mail: [ovchin@grsu.by](mailto:ovchin@grsu.by)

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЯЗКОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК НАНОЖИДКОСТЕЙ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ КОНЦЕНТРАЦИИ ГИБРИДНОГО МАТЕРИАЛА

*В статье представлены результаты исследований реологических, триботехнических свойств смазочных материалов на основе полярных и неполярных жидкостей, модифицированных нанодисперсными углеродными частицами, получаемыми методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза. Установлено, что введение нанодисперсных углеродных частиц в смазочную среду приводит к изменению вязкостных и триботехнических характеристик, причем при малых концентрациях модификатора наблюдаются наиболее существенные снижения значений коэффициента трения по сравнению с исходной смазкой.*

**Ключевые слова:** смазочный материал, морфология, модификация, вязкость, жидкость, нанокремний.

**Y. V. Auchynnika**

## STUDY OF THE VISCOSITY CHARACTERISTICS OF NANOFLUIDS DEPENDING ON THE CONCENTRATION OF THE HYBRID MATERIAL

*The article presents the results of studies of the rheological and tribotechnical properties of lubricants based on polar and nonpolar liquids modified by nanodisperse carbon particles obtained by self-propagating high-temperature synthesis. It was found that the introduction of nanodispersed carbon particles into the lubricant medium leads to changes in the viscosity and tribotechnical characteristics, and at low concentrations of the modifier, the most significant decreases in the values of the coefficient of friction are observed in comparison with the initial lubricant.*

**Keywords:** lubricant, morphology, modification, viscosity, liquid, nanocarbon.

### 1. Введение.

Основным видом дефектов, приводящим к выходу деталей и изделий в машиностроении являются механические отказы при эксплуатации, связанные с трением и износом. Применение смазочных материалов является высокоэффективным способом повышения энергоэффективности, снижения интенсивности изнашивания. В инженерных приложениях смазочные материалы оказывают значительное влияние на механическую долговечность трибосистемы, при этом позволяют регулировать давление в контакте трущихся тел, выполняют функции охлаждающих систем, повышают стабильность работы трибоузла и минимизируют значение силы трения и износа между контактирующими телами [1]. Применение твердых углеродных наночастиц в качестве присадок к смазочным материалам может значительно увеличить износостойкость трущихся тел, существенно снизить коэффициент трения. Данный эффект может быть объяснен исходя из формирования устойчивого разделительного слоя способного выдерживать большие контактные нагрузки без разрушения и способностью к заполнению микронеровностей трущихся тел, что приводит к стабилизации процесса трения. В последние годы много исследований посвящено изучению антифрикционных свойств различных твердых модификаторов таких как: MoS<sub>2</sub>, WS<sub>2</sub>, графен и фуллерен, нанодисперсные алмазы детонационного синтеза, различного типа функционализированные нанодисперсные частицы (глины, алмазы, металлы, оксиды металлов и керамика). В частности большое количество работ посвящено частицам дисульфида молибдена, применяемого в каче-

стве присадки к различным видам смазки (пластичным, жидким и т.п.). В частности исследовались частицы  $\text{MoS}_2$  диаметром, находящимся в области 1 мкм, причем данные частицы обладали развитой поверхностью. Введение данных частиц в смазочное масло концентрацией ~ 2 масс.% приводит к снижению объемного износа на 10-30%.

Однако хотя твердые модификаторы приводят к существенному улучшению триботехнических характеристик, но сложность технологии изготовления, экологическая небезопасность, высокая стоимость ограничивают область применения данных модификаторов [2-4].

Более того, ограниченная механическая и химическая стабильность в смазочной среде данных модификаторов может привести к ухудшению свойств смазочной композиции при длительной эксплуатации. Например, неорганические модификаторы типа  $\text{MoS}_2$  или  $\text{WS}_2$  разрушаются при трении в режиме граничной смазки. Кроме того, некоторые добавки, содержащие серу, могут создавать в процессе трения кислотные соединения в смазочной среде, ускоряющие коррозию контактирующих тел.

Таким образом, разработка оптимальных составов присадок к смазочным материалам для улучшения триботехнических характеристик крайне необходима, особенно при экстремальных режимах трения. Углеродные частицы получаемые СВС-синтезом из природного сырья представляют интерес как добавки в смазочные материалы различной природы из-за их уникальных свойств, таких как технологическая простота получения, высокая дисперсность, химическая стабильность. Эти характеристики углеродных частицы, полученные СВС-синтезом делают их весьма перспективным модификатором для получения экологически чистых смазок и могут заменить добавки, содержащие серу и фосфор [5-6].

Целью данной работы является изучение вязкостных и физико-механических характеристик жидкостей, модифицированных нанодисперсными углеродными частицами и их композициями.

## 2. Методика эксперимента.

Триботехнические исследования проводились на машине трения типа FT-2, которая работает по схеме возвратно-поступательного движения, длина хода индентора 5 – 50 мм в условиях сухого трения (контртела), выполненного из стали и отшлифованного на ровной плоской поверхности наждачной шкуркой или шлифовальной пастой до среднего арифметического отклонения профиля поверхности  $R_a=0,1 - 0,3$  мкм.

Образцы закреплялись в зажиме машины трения, протирали тканью «бязь», отбеленной, смоченной в этиловом спирте, рабочую сферу и рабочую поверхность полимерного диска (контртела), после чего сушили две минуты при комнатной температуре. Испытания проводились при нормальной нагрузке на образец до 20 Н, линейной скорости скольжения 0,036 м/с, температуре поверхности полимерного образца ( $20 \pm 5^\circ\text{C}$ ). Подвод наносмазки осуществлялся в зону трения таким образом, чтобы обеспечить смешанный режим смазки.

Реологические характеристики образцов определялась методом Энглера. Данным методом вязкость определяется по времени истекания исследуемой жидкости из вискозиметра типа ВЗ-4 жидкости объемом 200 мл при определенной температуре при сравнении со временем истекания из вискозиметра такого же типа количества дистиллированной воды при  $20^\circ\text{C}$  (постоянная вискозиметра). В ходе измерений добиваются, чтобы тестируемая жидкость вытекала непрерывной струей.

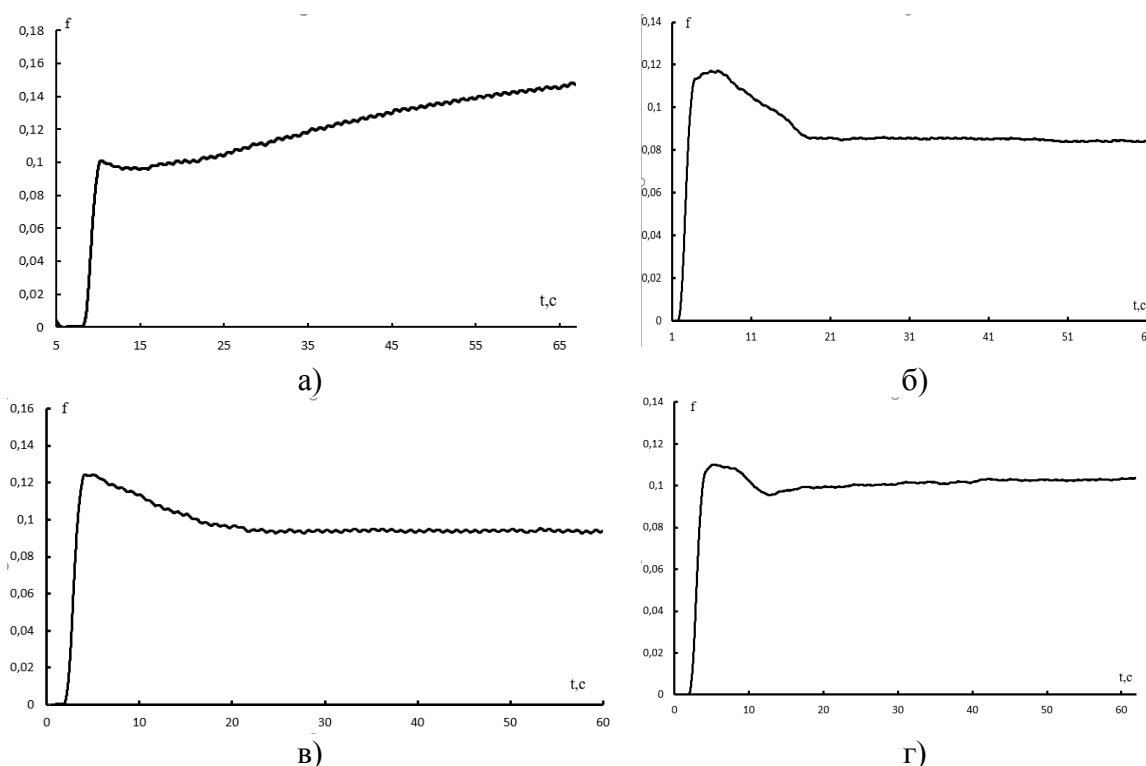
Вязкость в единицах Энглера при температуре Т определяется по формуле:

$$E_t = \frac{J_t}{J_{t1}}, \quad (1)$$

где  $J_t$  – время (в секундах) истечения 200 мл исследуемого образца жидкости при температуре  $T$ ;  $J_{tl}$  – время (в секундах) истечения 200 мл контрольной жидкости при температуре  $T$ .

### 3. Основное содержание и результаты работы.

Проведенные предварительные исследования по изучению триботехнических характеристик пары трения ПА6-ШХ15, испытываемых в смазочной среде состава масло И-20А, содержащее до 10 масс.% углеродных частиц, полученных СВС-синтезом показали уменьшение коэффициента трения для данной пары трения (рис.1). Испытания проводили на машине трения FT-2 по методике изложенной выше.



а – исходная пара трения, испытанная без подвода внешней смазки, б – пара трения, испытанная с подводом внешней смазки И-20, в - пара трения, испытанная с подводом внешней смазки И-20 и модифицированная 10 масс.% ультрадисперсного алмазосодержащего графита, г- пара трения, испытанная с подводом внешней смазки И-20 и модифицированная 10 масс.% углеродсодержащими частицами, синтезируемыми методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза.

Рисунок 1. Зависимость коэффициента трения от времени триботехнических испытания для пары сталь ШХ-15-полиамид 6 при трении со смазкой: а – исходная пара трения, испытанная без подвода внешней смазки, б – пара трения, испытанная с подводом внешней смазки И-20, в - пара трения, испытанная с подводом внешней смазки И-20 и модифицированная 10 масс.% ультрадисперсного алмазосодержащего графита, г- пара трения, испытанная с подводом внешней смазки И-20 и модифицированная 10 масс.% углеродсодержащими частицами, синтезируемыми методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза.

Исходя из полученных данных видно, что введение смазочной среды в зону трения приводит к уменьшению значений коэффициента трения на 30-40%. Однако, введение в смазочный состав углеродсодержащих частиц различной природы приводит к некоторому возрастанию коэффициента трения, что возможно обусловлено наличием твердого алмазного ядра для ультрадисперсного алмазосодержащего графита, а также наличием твердых аллотропных модификаций углерода для нанодисперсных частиц углерода, получаемых СВС-синтезом.

Другим аспектом, влияющим на незначительное возрастание коэффициента трения для нефтяных смазочных материалов является достаточно высокая концентрация модификатора в композиции (10 масс.%), которая приводит к загущению смазочного материала, т.е. увеличению вязкости модифицируемого жидкого материала. Проведенные эксперименты по исследованию триботехнических характеристик смазочных материалов при концентрации модификатора в пределах от 0,1-5 масс.% показал уменьшение значений коэффициента трения пары металл-полимера. Необходимо отметить, что для всех композиций на основе масла И-20А, модифицированного нанодисперсными углеродными частицами, в том числе полученными методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза наблюдается уменьшение интенсивности изнашивания на 14-32 %. Исследования вязкостных характеристик различного типа жидкостей показали снижение вязкости модифицируемых жидкостей в диапазоне от 0,01 масс.% до 1 масс.%. Увеличение концентрации модификатора выше 1 масс.% приводит к возрастанию значений вязкости исследуемых жидкостей измеренных в градусах Энглера (рис. 2-3).

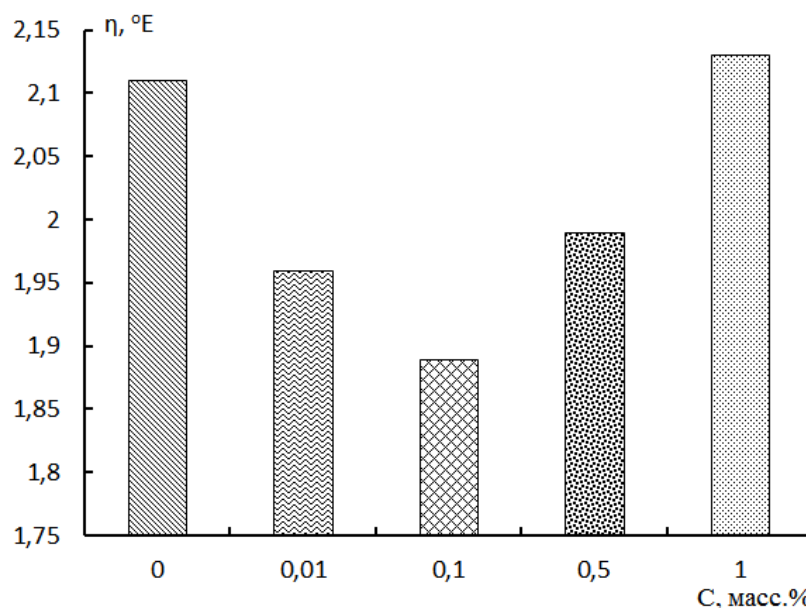


Рисунок 2. Зависимость вязкости масла И-20А, модифицированного нанодисперсными графеноподобными частицами.

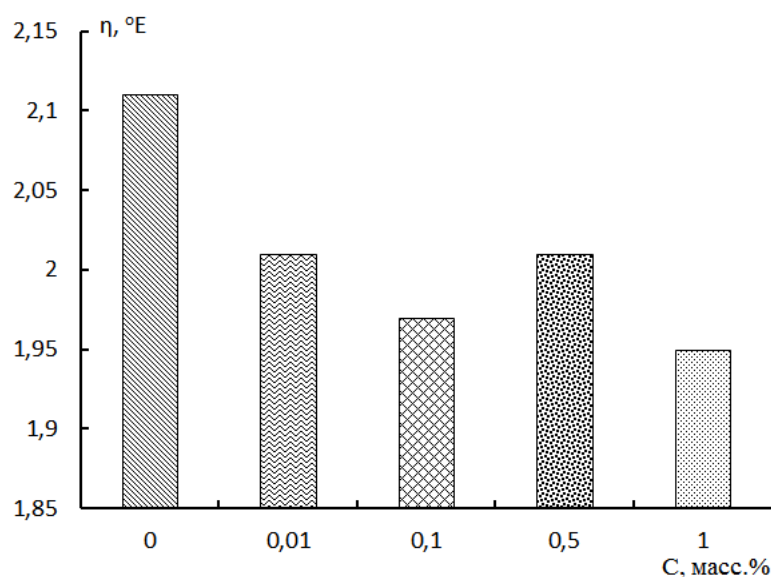


Рисунок 3. Зависимость вязкости масла И-20А, модифицированного нанодисперсными углеродными частицами, полученными методом СВС-синтеза.

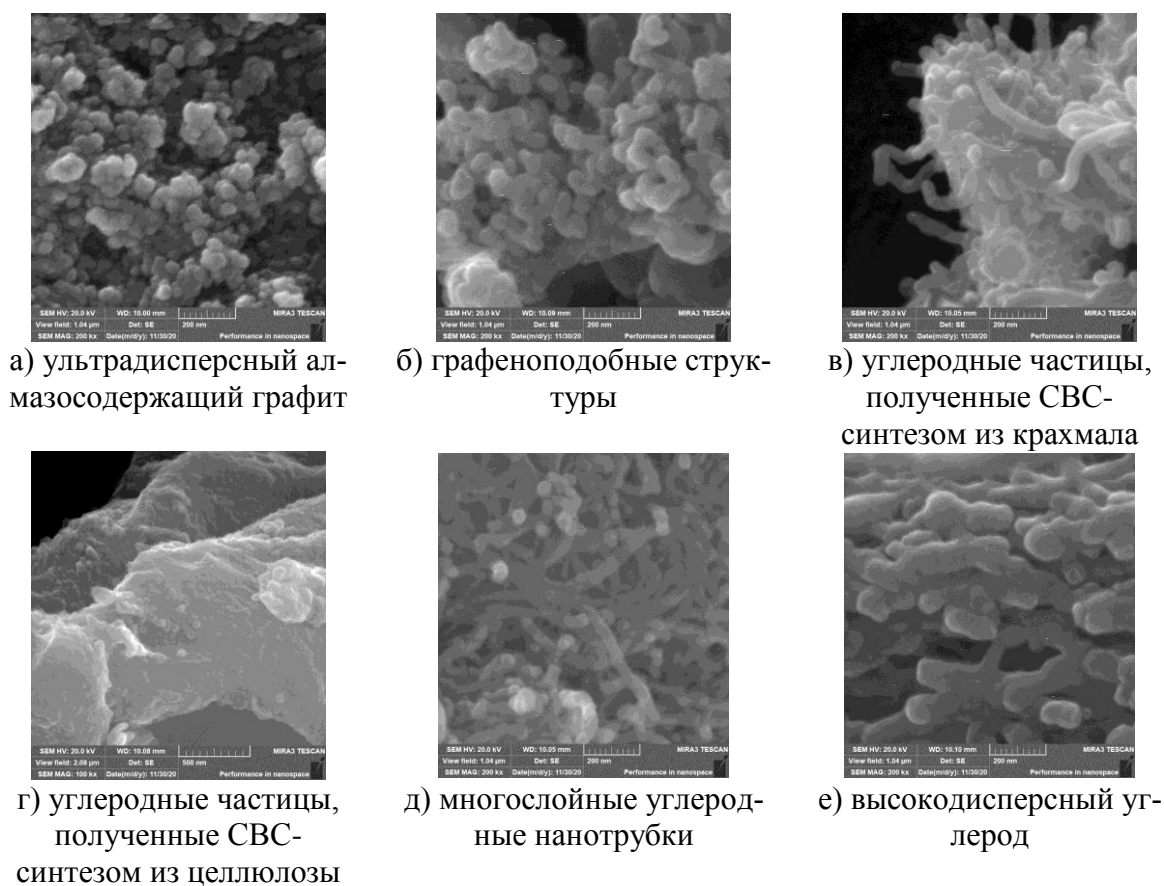
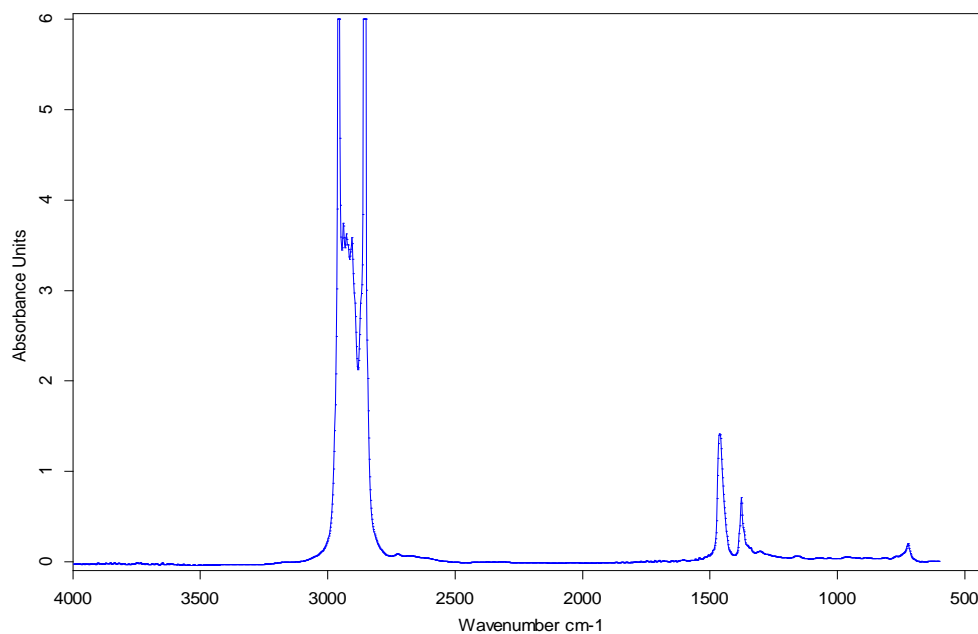
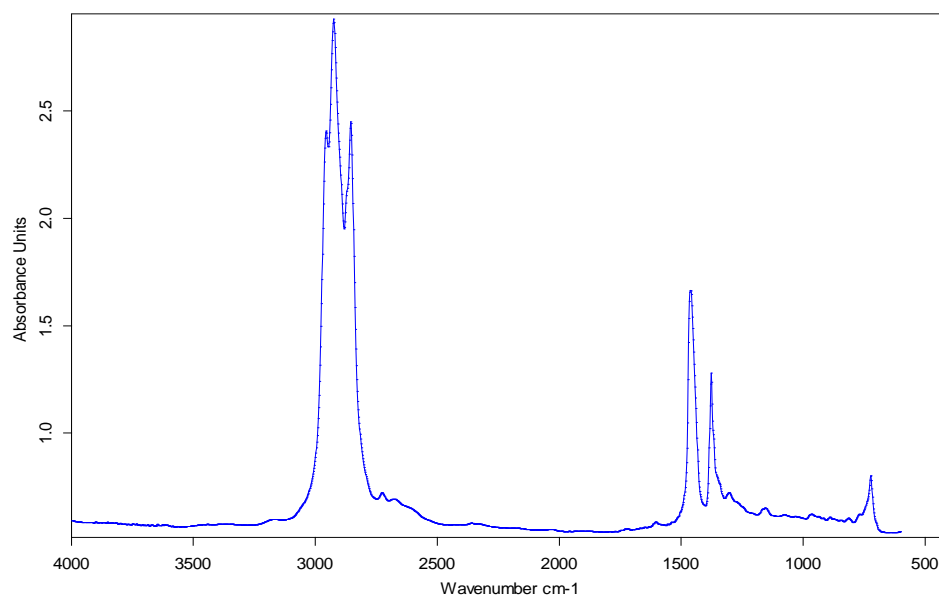


Рисунок 4. Морфология нанодисперсных углеродных частиц, полученных по различным технологиям.

Наличие нанодисперсных частиц в исследуемых углеродных модификаторах было определено с применением метода растровой электронной микроскопии (рис. 4). Исходя из представленных данных видно, что исследуемые частицы обладают высокими значениями удельной поверхности, различаются друг от друга морфологией.



а)



б)

а – исходное масло И-20А, б – масло И-20А, модифицированное углеродными частицами, полученными СВС-синтезом из целлюлозы (10 масс.%).

Рисунок 5. ИК-спектры масла И-20А, модифицированного нанодисперсными углеродными частицами, полученными методом СВС-синтеза.



Проведенные исследования по влиянию модификаторов на межмолекулярное взаимодействие с модифицируемой жидкостью показали отсутствие взаимодействия с образованием новых химических соединений при введении добавок в исходный смазочный материал (рис. 5).

#### 4. Заключение.

Таким образом, исходя из полученных данных видно, что введение нанодисперсных углеродных частиц в матрицу смазочного материала (масло И-20А, дистиллированная вода, этиленгликоль) при малых концентрациях модификатора до 1 масс.% приводит к снижению значений вязкости. Увеличение концентрации модификатора свыше 1 масс.% увеличивает вязкостные характеристики исследуемых жидких сред. Введение модификаторов в смазочные материалы не приводит к химическому взаимодействию с модифицируемым материалом. Нанодисперсные углеродные частицы обладают развитой морфологией и высокими значениями удельной поверхности, что сказывается на триботехнических характеристиках исследуемых смазочных сред. Введение исследуемых нанодисперсных частиц в матрицу смазочного материала приводит к незначительному возрастанию коэффициента трения при концентрациях свыше 10 масс.% по отношению к значениям коэффициента трения для базового смазочного материала. При содержании модификатора в области от 0,1 до 5 масс.% значения коэффициента трения уменьшаются на 14-32% по отношению к значениям коэффициента трения базового смазочного материала.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Виппер, А. Б., Зарубежные масла и присадки / А.Б. Виппер, А. В. Виленкин – М.:Химия, 1981. – 354 с.
2. Пластичные смазки для узлов трения универсальных шарниров / В.И. Воропай, Е. В. Овчинников, Г. А. Костюкович, Д. В. Буряков, Ю. В. Авдюнина // Машиностроение и техносфера XXI века: сб. трудов международной научно-технической конференции, Севастополь, 13-18 сент. 2004г. – Донецк: ДонНТУ, 2004. – Т.1. – С.143-146. – ISBN 978-3-319-30197-6
3. Овчинников, Е. В. Применение наноразмерных модификаторов в технологии получения композиционных смазочных материалов / Е. В. Овчинников и др. // Инновационные технологии в машиностроении: материалы междунар. науч.-техн. конф., Новополоцк, 29–30 окт. 2013 г. – Новополоцк: ПГУ, 2013. – С. 196-199. – ISBN 978-985-531-404-3.
4. Struk, V. A. Carbon modifier for mineral oils. / Struk, V. A., Ovchinnikov E.V., Kukla S.U. // International conference BALTRIB'99. – Kaunas, 1999. – P.124-126.
5. Воробьева, С. А. Влияние высокодисперсных металлоплакирующих присадок на антифрикционные и противоизносные свойства моторного масла / С.А. Воробьева, Е. А. Лавринович, В.В. Мушинский, А.И. Лесникович // Трение и износ. –1996. – №6. – С. 827-831. – ISSN 0202-4977.

Поступила в редколлегию 25.03.2021 г.

УДК 621.793.7

**Ф. И. Пантелеенко**, чл.-корр. НАН Б, д-р т. н., проф., **В. А. Оковитый**, к.т.н.,  
**О. Г. Девойно**, д-р т. н., проф., **А. С. Володько**, **В. А. Сидоров**, к.т.н., доцент,  
**В. В. Оковитый**, <sup>2</sup>**В. М. Асташинский**, чл.-корр. НАН Б, д-р физ.-мат. н., проф.

*Белорусский Национальный Технический Университет, г. Минск, Беларусь*

*Тел./ Факс+375 17 293-95-99, E-mail: [niil\\_svarka@bntu.by](mailto:niil_svarka@bntu.by)*

<sup>2</sup>*Института тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси, Минск, Беларусь*

<sup>2</sup>*Тел./Факс +375 17 284-24-91, <sup>2</sup> E-mail: [ast@hmti.ac.by](mailto:ast@hmti.ac.by)*

## СОВРЕМЕННОЕ ПРИМЕНЕНИЕ МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ СИСТЕМ МЕТАЛЛ-ХРОМ-АЛЮМИНИЙ-ИТТРИЙ (М-КРОЛЕЙ)

*В статье анализируются современное применение и особенности металлокерамических плазменных покрытий. Можно констатировать, что эти композиции (оксидно-металлический компонент) используются в качестве диэлектрических, теплозащитных и износостойких покрытий. В данной работе особое внимание уделено влиянию формируемой структуры на физико-механические и эксплуатационные свойства сплавов MCrAlYTa, армированных тугоплавкими оксидами (например, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiO<sub>2</sub>) и керамики Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiO<sub>2</sub> с добавлением твердых металлов. Чистые MCrAlYTa не подходят для трибологических применений, поскольку их низкая твердость может привести к очень высокому износу в условиях скользящего контакта, особенно в фазах обкатки при низких температурах. Поэтому изготовление композиционных покрытий на основе сплавов MCrAlYTa, армированных тугоплавкими оксидами, представляется необходимым решением для того, чтобы связать стойкость металла к окислению с твердостью и химической стабильностью керамической фазы.*

**Ключевые слова:** *металлокерамические плазменные покрытия, диэлектрические, теплозащитные и износостойкие покрытия, формованные структуры, физико-механические и эксплуатационные свойства, М-кролики, диоксид титана-оксид алюминия.*

**F. I. Panteleenko, V. A. Okovity, O. G. Devoino, A. S. Volodko, V. A. Sidorov, V. V. Okovity, V. M. Astashinsky**

### MODERN APPLICATION OF CERMET COATINGS BASED ON METAL-CHROMIUM-ALUMINUM-YTTRIUM SYSTEMS

*The article analyzes the current application and features of metal-ceramic plasma coatings. It can be stated that these compositions (oxide-metal component) are used as dielectric, heat-shielding and wear-resistant coatings. In this work, special attention is paid to the influence of the formed structure on the physicomachanical and operational properties of MCrAlYTa alloys reinforced with refractory oxides (for example, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiO<sub>2</sub>) and ceramics Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiO<sub>2</sub> with the addition of hard metals. Pure MCrAlYTa are not suitable for tribological applications because their low hardness can lead to very high wear under sliding contact conditions, especially during the running-in phases at low temperatures. Therefore, the fabrication of composite coatings based on MCrAlYTa alloys reinforced with refractory oxides seems to be a necessary solution in order to relate the resistance of the metal to oxidation with the hardness and chemical stability of the ceramic phase.*

**Keywords:** *metal-ceramic plasma coatings, dielectric, heat-shielding and wear-resistant coatings, formed structures, physical and mechanical and operational properties, M-rabbits, titanium dioxide-aluminum oxide.*

#### 1. Введение

В настоящее время в технике существует множество узлов трения, в которых применяются износостойкие материалы - шаровые и цилиндрические подшипники, вкладыши, подпятники, скользящие токосъемники, направляющие, шарнирные устройства, торцевые и боковые уплотнения и др. Они работают в разнообразных условиях - при граничном трении, со смазкой, при повышенных температурах, высоких скоростях, больших нагрузках, трении без смазки, в вакууме. Процессы коррозии, неблагоприят-

© Пантелеенко Ф.И., Оковитый В.А., Девойно О.Г., Володько А.С., Сидоров В.А., Оковитый В.В., Асташинский В.М.; 2021

ного воздействия изнашивания, являются главными причинами поломки металлоконструкций и деталей машин. По этим причинам в промышленности выходит из строя около 80-90% деталей. Все эти обстоятельства не дают возможности получить универсальный материал для работы в узлах трения. Возникает необходимость получения различных материалов для заданных условий работы в условиях трения. Из обзора литературы [1-16] известно, что самыми перспективными для получения износостойких плазменных покрытий, повышающих долговечность и надежность механизмов и машин, являются те материалы, которые могут выдерживать максимальные нагрузки без пластической деформации в парах трения в большом интервале эксплуатационных температур и обладающих наивысшей стойкостью при абразивном износе, способностью работать в агрессивных средах и вакууме. Наиболее перспективными для работы в таких условиях являются композиции, которые состоят из металлокерамической матрицы и равномерно распределенной в ней оксидной составляющей. Работоспособность таких композиций обеспечивается высокими прочностными свойствами металлокерамической матрицы. Постоянное воспроизведение данного слоя при работе в условиях трения, равномерно распределенной по всему объему материала, создает нужный эффект самосмазываемости. Все вышеперечисленные особенности позволяют предполагать, что плазменные износостойкие порошковые покрытия найдут широкое применение в техники, как защитные, так и антифрикционные [6-12]. Атмосферное плазменное напыление (APS) - это действующий коммерчески доступный метод, который использовался многими исследователями для создания экономически выгодных покрытий. Использование высоких температур и плотности энергии позволяют наносить покрытия из тугоплавких материалов, таких как  $Al_2O_3$ ,  $ZrO_2$  и другие, которые трудно расплавить с помощью традиционных процессов термического напыления [7]. По сравнению с керамическим плазменным покрытием, керметные, состоящие из керамических частиц, связанных с металлическими частицами, проявляют превосходную стойкость к тепловому удару в высокотемпературной атмосфере. Кроме того, они обладают совместными преимуществами керамики и металла, такими как твердость и ударная вязкость. Кроме того, эффективность покрытий может быть существенно повышена путем дальнейшего модифицирования их структуры при последующей высокоэнергетической обработке [8]. Высокоэнергетические источники подводимой энергии обладают рядом особенностей и преимуществ при последующей обработке плазменных покрытий: локальностью и высокой концентрацией получаемой энергии, которая позволяет обрабатывать нужный участок нанесенного покрытия без нарушения его структуры и свойств из-за нагрева всего объема; способностью управления параметрами обработки, обеспечивающими регулирование последующей структуры обрабатываемого слоя, его шероховатости, износостойкости, твердости, необходимых геометрических размеров; значительному уплотнению слоя покрытия после обработки и соответственно к снижению шероховатости и устранению пористости. Тем не менее необходимо учитывать способность высокоэнергетической обработки к изменению и перераспределению напряжений в покрытии, тем более существенному, чем меньше толщина покрытия и выше мощность излучения, именно поэтому требуется очень серьезная оптимизация режимов обработки [9].

## **2. Современное применение металлокерамических покрытий**

В работе [17] процесс осаждения с помощью плазменной наплавки (РТА) был применен для разработки высокотемпературных защитных металлокерамических покрытий, в NiCrAlY был добавлен наполнитель из стабилизированного иттрием диоксида циркония (YSZ) с двумя различными размерами частиц для создания керметных по-

крытий. Сплавы  $\text{MCrAlY}$  часто используются в качестве функционального верхнего покрытия или связующего покрытия при плазменном напылении и особенно полезны для защиты поверхностей от разрушения при высокой температуре в компонентах газовых турбин и авиационных двигателей. Новая область применения таких покрытий может быть разработана путем добавления частиц наполнителя к базовой матрице  $\text{MCrAlY}$  для формирования композиционных покрытий. Термически напыленные композитные покрытия  $\text{MCrAlY}$  с улучшенными функциональными свойствами благодаря добавлению армирующих элементов, таких как  $\text{CeO}_2$  [6],  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ;  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$  [18], диоксид циркония (CSZ) ( $\text{ZrO}_2\text{-25CeO}_2\text{-2,5Y}_2\text{O}_3$ ) [19] или иттрий-стабилизированный диоксид циркония (YSZ) ( $\text{ZrO}_2\text{-8Y}_2\text{O}_3$ ) [20–23] имеют повышенные механические свойства, коррозионную и термическую стойкость. Тем не менее, недостаточная связь между оксидами металла (наполнителей) и матрицей, образование трещин, пористость являются типичными недостатками термически напыленных покрытий. Для того, чтобы избежать или уменьшить эти дефекты и улучшить прочность сцепления покрытия с подложкой применяется последующая высокоэнергетическая обработка с помощью лазера или импульсной плазмы. В данной работе проведены исследования покрытий из композиционных материалов на основе металлической матрицы (ММС), нанесенных методом плазменной наплавки (ПТА). Композиты были приготовлены с использованием механических смесей YSZ ( $\text{ZrO}_2\text{-13 мас.}\% \text{ Y}_2\text{O}_3$ ), имеющих различные объемные концентрации, которые были включены в матрицу  $\text{NiCrAlY}$ . Морфологию и структуру композиционных покрытий анализировали с помощью микроскопических наблюдений, энергодисперсионной спектроскопии и дифракции рентгеновских лучей. Механические свойства ММС-покрытий оценивали по микротвердости.

Порошок  $\text{NiCrAlY}$ , используемый в качестве матрицы, представляет собой распыленный газом порошок (рис. 1а) с гранулометрическим составом 45–125 мкм. В качестве наполнителя использовали порошки  $\text{ZrO}_2\text{-13 мас.}\% \text{ Y}_2\text{O}_3$  с гранулометрическим составом 22–45 мкм (рис. 1б) и 5–22 мкм. Три порошка ММС были приготовлены механическим смешением двух порошков с использованием: (i) YSZ с распределением грануляции 22–45 мкм (10 и 30 об.% в смеси); и (ii) YSZ с распределением грануляции 5–22 мкм (20 об.% в смеси) с порошком металлической матрицы  $\text{NiCrAlY}$ .  $\text{ZrO}_2\text{-13 мас.}\% \text{ Y}_2\text{O}_3$  добавляли к матрице  $\text{NiCrAlY}$  для снижения теплопроводности покрытий. Изменение концентрации  $\text{Y}_2\text{O}_3$  приводит к стабилизации диоксида циркония в разных кристаллических фазах. Смеси механически смешивали и сушили при температуре около 120 °С в течение 24 часов. Поверхность подложки была подготовлена путем пескоструйной обработки и предварительного нагрева в печи на открытом воздухе при температуре около 365 °С для покрытий  $\text{NiCrAlY-10YSZ}$  и 400 °С для покрытий  $\text{NiCrAlY + 20YSZ}$  и  $\text{NiCrAl-30YSZ}$ . Во время процесса наплавки измерения температуры расплавленной ванны проводились с использованием инфракрасной камеры FLIR S C600, имеющей чувствительность в диапазоне длин волн  $\lambda = 8\text{-}14$  мкм. Измерения температуры проводились на расстоянии около 1,5 м от поверхности образца. Композитные покрытия были нанесены в один слой. Переменные параметры наплавки ПТА, такие как ток передаваемой дуги, напряжение и реальная скорость наплавки, а также постоянный параметр во время наплавки, такой как расход порошка, были сведены в один параметр, который представляет основные факторы осаждения  $Q$  ( $\text{Дж}\cdot\text{с}/\text{мм}\cdot\text{г}$ ) рассчитывается по формуле (1):

$$Q = \frac{P}{v \times d} \quad (1)$$

где:  $P$  представляет собой электрическую мощность передаваемой дуги (Вт);  $v$  представляет скорость сканирования поверхности (мм/с), а  $d$  представляет скорость по-

дачи порошка (г/с). Рабочие параметры, используемые для обработки MMC-покрытий, приведены в таблице 1. После обработки ПТА образцы охлаждали до комнатной температуры. Затем их подвергали термообработке при 500 °С в течение 2 ч и оставляли в печи для охлаждения до комнатной температуры, чтобы уменьшить остаточные напряжения, возникающие в процессе наплавки.

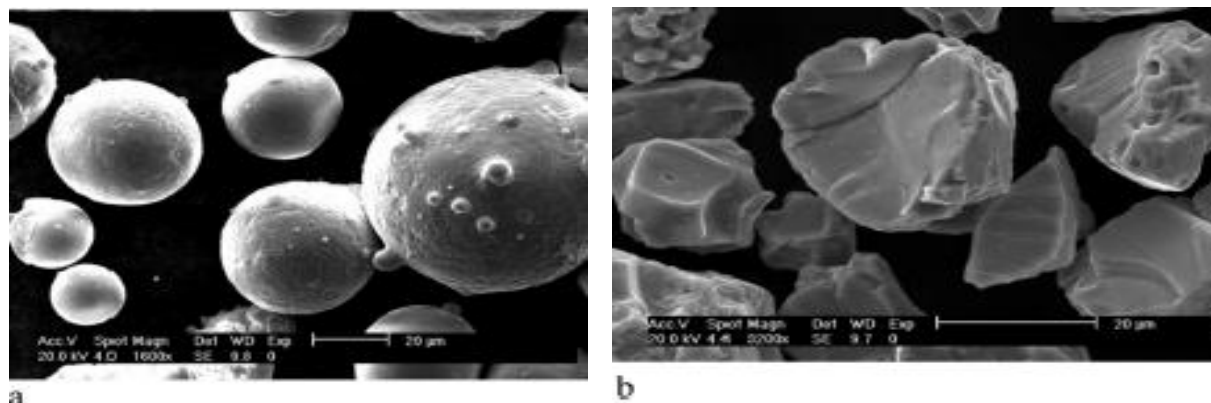


Рисунок 1. СЭМ-микрофотографии порошков, используемых для нанесения покрытий: а) порошок металлической матрицы NiCrAlY; б) порошок наполнителя YSZ с гранулометрическим составом 22–45 мкм.

Используя более низкую скорость колебаний, коррелированную с большим током передаваемой дуги, было реализовано металлургическое соединение между покрытием NiCrAlY + 10YSZ и подложкой. В случае NiCrAlY-30YSZ, поддерживая постоянную скорость колебаний, но уменьшая ток передаваемой дуги, на границе с подложкой образовывались оксидные островки. Затем для осаждения NiCrAlY-20YSZ скорость осцилляции и ток перенесенной дуги были увеличены для обеспечения высокой дисперсии энергии на локальном контакте между плазмой перенесенной дуги и подложкой. Покрытие NiCrAlY-10YSZ имеет небольшую пористость вблизи частиц YSZ. Напротив, NiCrAlY-30YSZ и NiCrAlY-20YSZ не имели такой пористости. Наличие пористости в композитном покрытии (включая матрицу) с меньшим количеством частиц наполнителя YSZ (NiCrAlY-10YSZ) по сравнению с NiCrAlY-30YSZ может быть обусловлено более низким значением Q-параметра. Это было получено при использовании более высокого тока перенесенной дуги в процессе разработки, коррелирующего с более низкой температурой подложки. Температура предварительного нагрева подложки (365 °С) также поддерживалась постоянной во время обработки. Наконец, было невозможно получить плотное покрытие. Более низкие размеры частиц, осажденных при постоянном давлении газа-носителя, улучшили микроструктуру покрытия, содержащего 20% YSZ. Дисперсия частиц YSZ небольшого размера была лучше в таком покрытии.

Композитные покрытия с более крупными размерами частиц обладали высокой средней микротвердостью по Виккерсу (HV<sub>0,3</sub>): 493 ± 38 для NiCrAlY - 10YSZ и 482 ± 40 для NiCrAlY - 30YSZ из-за присутствия включений оксида. Покрытие NiCrAlY - 20YSZ показало среднюю микротвердость по Виккерсу (HV<sub>0,3</sub>) 309±33, что объясняется уменьшенным числом включений оксида.

Наконец, было обнаружено, что керметные покрытия, включающие мелкие частицы YSZ-наполнителя в концентрации 20 об.% в матрице NiCrAlY, были оптимальным выбором среди всех протестированных в представленных условиях. Это связано с лучшим включением мелких частиц YSZ в металлическую матрицу, хорошей метал-

лургической связью с подложкой и отсутствием микроструктурных дефектов в морфологии покрытия, но с меньшей микротвердостью.

Таблица 1. – Рабочие параметры, используемые для обработки ММС-покрытий.

Покрытие	Q, Дж·с/ мм·г	Ток дуги, А	Расход плазмо- образу- ющего аргона, л/мин	Расход защит- ных га- зов (Ar-H <sub>2</sub> ), л/мин	Скорость осцилляции, мм/с	Расход тр. га- за, л/мин	Дист. обра- ботки, мм
NiCrAlY + 10YSZ	4884	162	1,4	1,4	3,9	3,5	8
NiCrAlY + 30YSZ	4972	153	1,4	1,4	3,9	3,5	8
NiCrAlY + 20YSZ	4001	160	1,4	1,4	4,9	3,5	8

В источнике [24] слои NiCrAlY, содержащие различные количества Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (0, 3, 6, 12, 18 мас.%), Наносились на подложки из нержавеющей стали с помощью «гибридного» плазменного распыления, при котором порошок NiCrAlY подавался в сухом виде, в то время как мелкодисперсный порошок Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> диспергировался в этанол и вводился через систему подачи суспензии. Покрытия для долговременной защиты механических компонентов от сильного износа скольжения при высоких температурах широко используются в различных областях промышленности, в первую очередь в области производства энергии. Примеры включают защиту валов и подшипников в авиационных и наземных газовых турбинах [25], деталей паровых турбин [26] и компонентов для атомных электростанций [27] и т. д.

В настоящее время, однако, эта проблема полностью не решена. Твердые металлы, особенно те, которые основаны на карбидах хрома (например, Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-NiCr), довольно широко используются [28], но они имеют ряд недостатков. Из-за их высокой твердости обработка этих покрытий трудоемка и дорога. Они также обладают неоптимальной стойкостью к окислению при самых высоких температурах из-за внутренней диффузии кислорода через частицы карбида хрома и, следовательно, из-за их избирательной деградации [29].

Лучших характеристик в окислительных средах можно достичь с помощью систем на основе сплавов типа MCrAlY (где M=Co и/или Ni), которые соответственно используются для предотвращения окисления и горячей коррозии лопаток турбин, лопаток и других компонентов в горячем состоянии. секции газовых турбин, до 1100 °C [30]. В большинстве цитируемых ссылок такие композиты MCrAlY + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> наносились с помощью процессов термического напыления: их основные преимущества включают высокую производительность и гибкое соединение большого разнообразия материалов для покрытий и подложек [31]. Они действительно являются стандартным выбором для нанесения стойких к окислению сплавов MCrAlY в вышеупомянутых применениях газовых турбин [31-33]. Все образцы были изготовлены методом плазменного напыления в атмосфере с использованием горелки TriplexPro-200 (Oerlikon-Metco, Wohlen, Швейцария) с тремя катодами и одним анодным соплом. Исходным сырьем для матрицы MCrAlY стандартный порошок Ni - 22 мас.% Cr - 10 мас.% Al - 1 мас.% Y (AMDRY 9624, Oerlikon-Metco) с номинальным гранулометрическим составом - 45+15 мкм, который традиционно подавали на факел в сухом виде. Исходным материалом для арми-

рования  $\text{Al}_2\text{O}_3$  был субмикрометрический порошок (АКР-30, Sumitomo Chemicals Co., Япония) со средним размером частиц 300 нм. Поскольку эти мелкие частицы обладали бы недостаточной текучестью и недостаточным импульсом для обычной подачи в поток плазмы с использованием газового носителя, порошок диспергировали в среде этанола с помощью 2 мас.% Диспергатора (Veicostat C213) и подавали с использованием системы доставки жидкости на основе резервуаров под давлением жидкости. Суспензия подается через инжектор с сапфировым соплом диаметром 150 мкм. Инжектор наклонен под углом  $70^\circ$  относительно оси горелки и расположен таким образом, что поток суспензии направлен к центру выхода из сопла анода. Параметры напыления NiCrAlY и  $\text{Al}_2\text{O}_3$  приведены в таблице 2. Чтобы изменить относительные количества матрицы NiCrAlY и армирования  $\text{Al}_2\text{O}_3$  в покрытиях, скорость подачи порошка NiCrAlY и содержание твердого вещества в суспензии варьировали, как указано в таблице 3. Цель настоящего испытания состояла в том, чтобы проанализировать характеристики различных покрытий в зависимости от температуры и содержания  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , а также дать общее представление об их основных характеристиках износа скольжения. Для этой цели в качестве контртела были выбраны спеченные шарики  $\text{Al}_2\text{O}_3$  диаметром 6 мм. Из-за своей химической инертности они не вызывают нежелательных трибохимических взаимодействий с материалом покрытия. Износостойкость образцов была исследована в условиях сухого скольжения путем однонаправленного испытания вращающимся шариком на диске в соответствии со стандартом ASTM G99 (рисунок 2). Испытания проводились на расстоянии скольжения 2000 м при относительной скорости скольжения 0,10 м/с и радиусе следа износа 5 мм при нормальной нагрузке 5 Н. Испытания проводились при комнатной температуре (Е 25 °С) при 400 °С и 700 °С, чтобы охватить широкий диапазон температур, относящихся к широкому спектру потенциальных применений. Образцы после нанесения и образцы, испытанные при 400 °С, имеют аналогичные значения твердости которые имеют тенденцию к увеличению с количеством  $\text{Al}_2\text{O}_3$  до 12 мас.% (рисунок 3) м при относительной скорости скольжения 0,10 м/с и радиусе следа износа 5 мм при нормальной нагрузке 5 Н. Это увеличение, однако, не очень заметно, вероятно, из-за несколько ограниченной когезии частиц  $\text{Al}_2\text{O}_3$  с окружающими ламелями NiCrAlY. Дальнейшее увеличение содержания  $\text{Al}_2\text{O}_3$  до 18 мас.% Даже приводит к тому, что твердость снова снижается, вероятно, из-за избыточного количества дефектов, возникающих при кластеризации частиц  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Напротив, после выдерживания при 700 °С значения твердости значительно возрастают и становятся практически нечувствительными к содержанию  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

Твердость повышается из-за повышения как внутривламельной прочности (благодаря выделению твердой [31], мелкодисперсной  $\beta$ -фазы), так и межламельной когезии (благодаря заживлению межламельных границ). Эти эффекты определенно преобладают над эффектом усиления  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , так как сцепление последнего с окружающей матрицей остается ограниченным: диффузия не повлияет на  $\text{Al}_2\text{O}_3$  при 700 °С. Скорость износа чистого покрытия NiCrAlY при комнатной температуре составляет  $5 \times 10^{-4} \text{ мм}^3/(\text{Нм})$ . Для сравнения, эта величина более чем на порядок выше, чем у термически напыленных покрытий Fe-Cr-B и Ni-Cr-B-Si, протестированных в идентичных условиях авторами в предыдущих работах ( $1-5 \times 10^{-5} \text{ мм}^3/(\text{Нм})$ ) [33].

Добавление до 6 мас.%  $\text{Al}_2\text{O}_3$  приводит к снижению скорости износа при комнатной температуре до  $1-5 \times 10^{-5} \text{ мм}^3/(\text{Нм})$  (рис. 2). При увеличении содержания  $\text{Al}_2\text{O}_3$  скорости износа стремятся к  $6 \times 10^{-6} \text{ мм}^3/(\text{Нм})$ , то есть ниже, чем у ранее упомянутых неармированных покрытий Fe-Cr-B и Ni-Cr-B-Si. В то время как потеря износа неармированного покрытия NiCrAlY непрерывно уменьшается от комнатной температуры до



400 °С и 700 °С, потери износа композиционных покрытий с 6-18 мас.%  $Al_2O_3$  ниже при комнатной температуре, чем при 400 °С.

Таблица 2. – Параметры процесса плазменного напыления.

NiCrAlY	Диаметр анодного сопла, мм	6,5
	Ток, А	450
	Напряжение, В	103,4
	Тип первичного газа / скорость потока (расход), SL/мин	Ar/70
	Энтальпия плазмы, МДж/кг	12,8
	Дистанция напыления, мм	100
	Температура предварительного нагрева подложки, °С	200-250
	Количество циклов предварительного нагрева	20
$Al_2O_3$	Диаметр порошкового инжектора, мм	1,8
	Скорость подачи порошка, г/мин	10-35
	Расход подаваемого газа, SL/мин	7
	Давление нагнетания, МПа	0,6
	Содержание твердого вещества в суспензии, мас.%	10-40
	Скорость подачи суспензии, мл/мин	30

Таблица 3. – Скорости подачи порошка и концентрации суспензии для экспериментов.

Соотношение, вес.%	Фактическое содержание $Al_2O_3$ , вес%	Содержание твердых веществ в суспензии, вес%	Скорость подачи сухого порошка, г/мин
NiCrAlY	0	-	20
NiCrAlY + 3% $Al_2O_3$	3,4	10	35
NiCrAlY + 6% $Al_2O_3$	5,9	10	20
NiCrAlY + 12% $Al_2O_3$	12,1	20	10
NiCrAlY + 18% $Al_2O_3$	17,6	40	10

«Гибридный» процесс атмосферного плазменного напыления с системой двойного впрыска использовался для получения композиционных покрытий NiCrAlY- $Al_2O_3$  для защиты от скольжения механических компонентов в широком диапазоне температур. Обычная подача порошка NiCrAlY в сухом виде сочеталась с инжекцией суспензия мелких частиц  $Al_2O_3$ , диспергированных в этаноле. Покрытия состоят из крупных NiCrAlY-ламелей с вкраплениями мелких округлых частиц  $Al_2O_3$ . Распыление на воздухе вызвало некоторое окисление вдоль границ фазы NiCrAlY, уменьшив межламеллярную когезионную прочность и лишив металлический сплав его наиболее реакционноспособных элементов (а именно Al и Y).

Добавление частиц  $Al_2O_3$  вызывает лишь незначительные изменения твердости. Добавление  $Al_2O_3$  приводит к монотонному снижению скорости скольжения при комнатной температуре от  $5 \times 10^{-4}$  мм<sup>3</sup>/(Нм) для чистого NiCrAlY до  $6 \times 10^{-6}$  мм<sup>3</sup>/(Нм) для NiCrAlY – 18 мас.%  $Al_2O_3$ . Чистый NiCrAlY страдает от сильного адгезионного расслаивающего износа, чему способствует наличие хрупких межламеллярных оксидных включений.

В композиционных покрытиях механизм износа изменяется на трибоокисление с незначительным появлением адгезии. Вытягивание некоторых частиц  $Al_2O_3$  является ключевым фактором для инициирования формирования трибо-слоя, который постепенно развивается за счет размазывания и уплотнения окисленных фрагментов NiCrAlY.

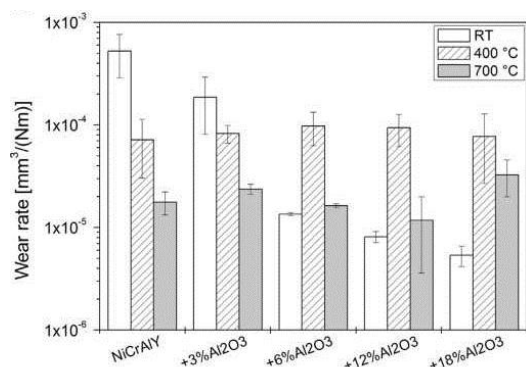


Рисунок 2. Скорости износа при скольжении шарик-на-диске при комнатной температуре, 400 °С и 700 °С

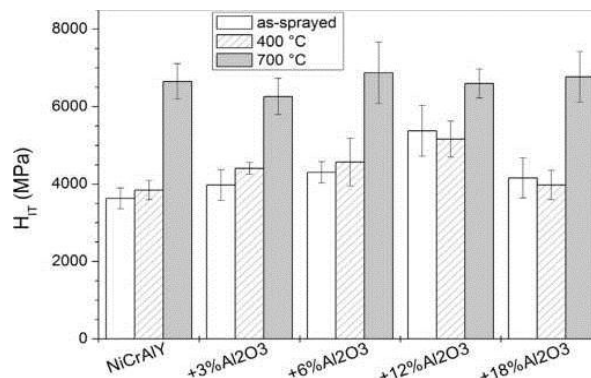


Рисунок 3. Значения твердости на всех образцах до и после изотермического выдерживания при 400 °С и 700 °С во время испытаний на износ

Износ протекает из-за локального растрескивания и откола трибослоя, что иногда приводит к адгезионному износу. При 400 °С и 700 °С скорость износа всех образцов выравнивается до  $8 \times 10^{-5} \text{ мм}^3/(\text{Нм})$  и  $2 \times 10^{-5} \text{ мм}^3/(\text{Нм})$  соответственно. Доминирующим механизмом износа является трибоокисление, но в этом случае оно происходит посредством прямого окисления поверхности покрытия с образованием плотного «глазурного» слоя. Поэтому эффект от добавления  $\text{Al}_2\text{O}_3$  становится неактуальным. Дополнительные изменения в матрице NiCrAlY, происходящие при 700 °С (частичное заживление межламеллярных границ и внутриламеллярное переосаждение субмикрометрической фазы  $\beta\text{-NiAl}$ ), дополнительно способствуют уменьшению возникновения адгезионного износа в открытых областях. Это вместе с лучшей стабильностью слоя «глазури» при этой температуре объясняет, почему скорость износа при 700 °С ниже, чем при 400 °С.

### 3. Заключение

На основе анализа современного применения и особенностей металлокерамических плазменных покрытий можно констатировать, что данные композиции (оксид-металлическая составляющая) используются в качестве диэлектрических, теплозащитных и износостойких покрытий. Предлагаемое нами направление исследований касается технологии нанесения износостойких покрытий для восстановления и упрочнения деталей трибосопряжений, эксплуатирующихся при неблагоприятных условиях граничной смазки или в отсутствие смазочного материала, при повышенных нагрузках и колебаниях температур (моторостроение, металлургическое оборудование, авиационная и космическая техника). Согласно результатам проведенных исследований для таких условий эффективны упрочненные газотермические покрытия, содержащие твердые тугоплавкие соединения. Указанные покрытия наносят плазменным напылением с последующей высокоэнергетической обработкой импульсами компрессионной плазмы (лазерного излучения). К факторам износостойкости в данном случае относится состав композиционных частиц исходных порошков, обеспечивающий эффективную структуру покрытий. Кроме того, высокоэнергетическая обработка плазменных покрытий обеспечивает их упрочнение за счет уплотнения и формирования измельченной (нанокристаллической), неравновесной (аморфной) структуры при сверхбыстром охлаждении оплавленных слоев толщиной 30 – 100 мкм. Вместе с тем для окончательных выводов и решений, направленных на успешное внедрение упомянутых покрытий, целесообразно изучить перспективы синтеза новых композиционных порошков из керамики с применением добавок тугоплавких металлов и разработать критерии прогнозирова-

ния свойств покрытий из них, полученных плазменным напылением; исследовать и оптимизировать технологических параметров плазменного напыления композиционных порошков.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Okovity, V. Plasma wear-resistant coatings with the inclusion of solid lubricants. *Welding production* – M., 2002. – №6. – С.41-43.
2. Okovity, V. Plasma wear-resistant coatings with inclusions of a solid lubricant / V. Okovity // *J. Welding International*. – 2003. – vol.16, № 11. – P. 918-920.
3. Okovity, V. A. Paramets optimization for plasma spraying and pulsed plasma treatment of surface layers of gas-thermal composite coatings based on multifunctional oxide ceramics / V.A. Okovity, A.I. Shevtsov, V.V. Okovity, V.M. Astashinsky, E.A. Kostyukevich // *High Temperature Material Processes* 18(1–2), 45–62 (2014).
4. Okovity, V. A. Optimization of the process of spraying wear-resistant coatings based on multifunctional oxide ceramics / V.A. Okovity, A.F. Panteleenko // *Processing of metals*. – Novosibirsk, 2015. – №2 (67). – P.46-54.
5. Okovity, V. A. Technological features of the formation of plasma powder coatings from ceramics with a nonequilibrium structure / V.A. Okovity, F.I. Panteleenko, V.M. Astashinsky, V.V. Bruised // “*Science and Technology*”, BNTU – Minsk, 2018. – Issue 3. – P. 183-189.
6. Vityaz, P. A. Theory and practice of applying protective coatings / P.A. Vityaz, V.S. Ivashko, A.F. Ilyuschenko, A.I. Shevtsov, E.D. Manoilo. – Minsk, 1998.
7. Vityaz, P. A. Basics of application of wear-resistant, corrosion-resistant and heat-protective coatings / P.A. Vityaz, A.F. Ilyuschenko, A. I. Shevtsov. – Minsk: Belarusian. Science, 2006. – P.205-243, 280-300, 314-351.
8. Ilyuschenko, A. F. Plasma coatings based on ceramic materials / A.F. Ilyuschenko, V.A. Okovity, A.I. Shevtsov. – Minsk: Besprint, 2006. – 316 p.
9. Асташинский, В. М. Получение и исследование элементов экранной противометеорной защиты на основе многослойных композиционных плазменных покрытий NiAl-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> / В.М. Асташинский [и др.] // *Труды международного форума «15-Минский международный форум по тепломассообмену» Минск, 23-26 мая 2016.* – С. 40-44.
10. Ильющенко, А. Ф. Формирование газотермических покрытий: теория и практика / А.Ф. Ильющенко В.А. Оковитый, С.П. Кундас, Б. Форманек. – Минск: Беспринт, 2002. – 480 с.
11. Ильющенко, А. Ф. Теплозащитные покрытия на основе ZrO<sub>2</sub> / А.Ф. Ильющенко [и др.]. – Минск: Ремика, 1998. – 128 с.
12. Достанко, А. П. Процессы плазменного нанесения покрытий: теория и практика / А.П. Достанко, А.Ф. Ильющенко, С.П. Кундас. – Минск: Армита - Менеджмент, 1999. – 436 с.
13. Современные технологии нанесения теплозащитных керамических покрытий / В.С. Ивашко и др. // *Известия Белорусской инженерной академии.* – 1997. – № 2(4). – С. 28-32.
14. Оковитый, В. В. Технологические особенности формирования теплозащитных покрытий на основе диоксида циркония / Оковитый В.В. [и др.] // *Наука и техника.* – БНТУ, 2016. – Вып.3. – С.193-199.
15. Оковитый, В. А Формирование и исследование многослойных композиционных оксидных плазменных покрытий на элементах экранной противометеорной защиты для международного научно-технического журнала / Оковитый В.А. и др.// *Наука и техника.* – БНТУ, 2016. – С.270-276.

16. Пантелеенко, Ф. И. Разработка технологии нанесения плазменных композиционных покрытий на основе диоксида циркония для систем космических аппаратов / Пантелеенко Ф.И. [и др.] // Наука и техника. – Минск: БНТУ, 2015. – Вып.3. – С.5-9.
17. Микроструктурные исследования стабилизированных NiCrAlY - Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> керметных покрытий ZrO<sub>2</sub>, нанесенных плазменной дугой (ПТА), Surf. Coat. Technol. 201 (2007) 6057–6074.
18. X. Sun, S. Chen, Y.Wang, Z. Pan, L. Wang, Mechanical properties and thermal shock resistance of HVOF sprayed NiCrAlY coatings without and with nano ceria, J. Therm. Spray Technol. 21 (5) (2012) 818–824.
19. L. Zhou, W. Zhou, F. Luo, J. Su, D. Zhu, Y. Dong, Microwave dielectric properties of low power plasma sprayed NiCrAlY/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composite coatings, Surf. Coat. Technol. 210 (2012) 122–126.
20. J.H. Lee, D.B. Lee, Hot corrosion of NiCrAlY/(ZrO<sub>2</sub>–CeO<sub>2</sub>–Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) composite coatings in NaCl–Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> molten salt, Mater. Sci. Forum 658 (2010) 228–231.
21. C. Zhu, Y.G. Wang, L.N. An, A. Javed, P. Xiao, G.Y. Liang, Microstructure and oxidation behavior of conventional and pseudo graded NiCrAlY/YSZ thermal barrier coatings produced by supersonic air plasma spraying process, Surf. Coat. Technol. 2015.04.014.
22. D.B. Lee, C. Lee, High-temperature oxidation of NiCrAlY / (ZrO<sub>2</sub>–Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and ZrO<sub>2</sub>–CeO<sub>2</sub>–Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) composite coatings, Surf. Coat. Technol. 193 (2005) 239–242.
23. A.M. Khoddami, A. Sabour, S.M.M. Hadavi, Microstructure formation in thermal-sprayed duplex and functionally graded NiCrAlY/Yttria-stabilized zirconia coatings, Surf. Coat. Technol. 201 (2007) 6019–6024.
24. Трибология композиционных покрытий NiCrAlY -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> полученных методом плазменного напыления с гибридной подачей сухого порошка -суспензии., Surf. Coat. Technol. 201 (2007) 6030–6044.
25. J.R. Davis, Handbook of Thermal Spray Technology, ASM International, Materials Park, OH, USA, 2004.
26. B.S. Mann, B. Prakash, High temperature friction and wear characteristics of various coating materials for steam valve spindle application, Wear 240 (2000) 223-230.
27. R.N. Johnson, Wear resistant coatings for reactor components in liquid sodium environments, J. Vac. Sci. Technol. 11 (1974) 759.
28. C.C. Li, Characterization of thermally sprayed coatings for high temperature wear protection applications, Thin Solid Films 73 (1980) 59-77.
29. W.J. Bryan, D. Jones, Wear resistant coating for components of fuel assemblies and control assemblies, and method of enhancing wear resistance of fuel assembly and control assembly components using wear-resistant coating, US Patent No. 5,434,896, 1995.
30. S. Matthews, B. James, M. Hyland, High temperature erosion-oxidation of Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-NiCr thermal spray coatings under simulated turbine conditions, Corros. Sci. 70 (2013) 203-211.
31. S. Bose, High Temperature Coatings, Butterworth-Heinemann, Oxford, UK, 2007.
32. J.A. Cabral-Miramontes, C. Gaona-Tiburcio, F. Almeraya-Calderon, F.H. Estupinan- Lopez, G.K. Pedraza-Basulto, CA Poblano-Salas, Parameter studies on high-velocity oxy-fuel spraying of CoNiCrAlY coatings used in the aeronautical industry, Int. J. Corros. 2014 1-8.
33. S. Li, C. Langlade, S. Fayeulle, D. Trkheux, Influence of the microstructure of plasma deposited MCrAlY their tribological behaviour, Surf. Coat. Technol. 101

Поступила в редколлегию 30.03.2021 г.

УДК 621.9.048.6

А. Г. Самуль, аспирант, В. П. Гилета, к.т.н., доцент, А. И. Насонов, аспирант  
Новосибирский государственный технический университет, Россия  
E-mail: [samul.2012@corp.nstu.ru](mailto:samul.2012@corp.nstu.ru)

## МИКРОГЕОМЕТРИЯ ДЕТАЛЕЙ ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ ПОСЛЕ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ПОВЕРХНОСТНО-ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ

*В работе на основании сравнения кинематических параметров ультразвукового поверхностно-пластического деформирования (УЗПД) при различных направлениях колебаний инструмента к поверхности, выбрана касательная схема УЗПД для деталей из алюминиевых сплавов Д16 и Д16Т. Исследовано влияние статической нагрузки и скорости обработки на микрогеометрическое состояние образцов. Выявлено, что данная обработка формирует отличную от алмазного выглаживания топографию поверхности и обеспечивает уменьшение высотных параметров шероховатости.*

**Ключевые слова:** ультразвуковая обработка, микрогеометрия, колебания, шероховатость

A. G. Samul, B. P. Gileta, A. I. Nasonov

## MICROGEOMETRY OF PARTS MADE OF ALUMINUM ALLOYS AFTER ULTRASONIC SURFACE-PLASTIC DEFORMATION

*In this work the tangent scheme of USM for parts made of aluminum alloys D16 and D16T is selected based on a comparison of the kinematic parameters of ultrasonic surface machining (USM) at different directions of vibration of the tool to the surface. The effect of static load and machining speed on the microgeometric state of the samples is investigated. It is revealed that this machining forms a surface topography different from diamond burnishing and provides a decrease in the height parameters of roughness.*

**Keywords:** ultrasonic surface machining, surface micro-geometry, vibrations, roughness.

### Введение

С развитием науки и техники постоянно увеличивается номенклатура изготавливаемых машин и ассортимент используемых материалов. При этом обеспечение высоких эксплуатационных свойств достигается как за счёт применения современных конструктивных решений и материалов, так и совершенствования технологий производства деталей.

В настоящее время наряду с лезвийной и абразивной обработкой деталей широко применяются методы поверхностного пластического деформирования (ППД), которые при незначительных экономических затратах обеспечивают благоприятное, с эксплуатационной точки зрения, сочетание геометрических и физико-механических параметров качества поверхностного слоя.

Свойства ПС, формируемые при ППД, во многом определяются как силовыми факторами, так и характером взаимодействия инструмента (индентора) с обрабатываемой поверхностью. По этим признакам все методы ППД подразделяются на статические и динамические. Отличительной особенностью последних является наличие импульсного характера воздействия индентора на поверхность детали, что позволяет более полно реализовывать пластические свойства обрабатываемых материалов.

Одним из перспективных представителей динамических методов ППД является поверхностное пластическое деформирование инструментом, колеблющимся с ультразвуковой частотой (УЗПД). Этот метод позволяет интенсифицировать пластическое течение материала поверхностного слоя детали и обеспечивать высокий выглаживающий и упрочняющий эффект на деталях, выполненных из материалов средней и высокой

твёрдости ( $>100$  HV) [1-3]. При этом применяются колебания, направленные по нормали к обрабатываемой поверхности (нормальная схема) [4-7]. Процесс характеризуется высокими скоростями деформирования, которые позволяют реализовать максимальный деформационный эффект. Данному методу обработки посвящено множество исследований, и он получил широкое распространение на предприятиях машиностроения.

Применение УЗПД (по нормальной схеме) для деталей из цветных металлов и сплавов с твёрдостью менее 100HV показало, что в результате интенсивного течения материала поверхностного слоя происходит образование волнистости, и не обеспечивается требуемого качества ПС. Одним из возможных путей преодоления этой проблемы является изменение схемы напряжённо-деформированного состояния в очаге деформирования. Этого можно достичь путём подбора кинематико-динамических параметров УЗПД, в частности, сменой направления вектора колебательной скорости относительно поверхности детали. Для решения этой проблемы была предложена схема с вводом колебаний по касательной к обрабатываемой поверхности. Данный способ недостаточно освещён и его изучение вызывает практический и научный интерес. Поэтому определение возможности применения УЗПД по тангенциальной схеме для улучшения качества поверхности деталей, выполненных из цветных материалов, а также тонких износостойких покрытий является актуальной задачей.

В связи с этим целью являлось обеспечение стабильного качества поверхностного слоя с малыми значениями высотных параметров шероховатости при ультразвуковой обработке на материалах низкой твёрдости, на примере алюминиевых сплавов Д16 (34 HV) и Д16Т (57 HV).

#### Сравнение схем УЗПД.

Схема УЗПД с колебаниями инструмента по касательной к обрабатываемой поверхности представлена на рисунке 1. В ней сменный концентратор-инструмент (3) совершает осевые колебания (колебательная скорость  $V_k$ ) с закрепленным на боковой поверхности индентором (2). Инструмент усилием  $P_{CT}$ , создаваемым грузом (6), прижимается к поверхности обрабатываемой детали 1.

Сравнение УЗПД (рис. 1) от широко применяемого (рис. 2) показывает, что при изменении направлений колебаний с нормального на касательное приводит к преобразованию характера контакта индентора и детали с ударного на постоянный. Эти изменения приводят к смене вида следа обработки на деформируемой поверхности (рис. 3,4).

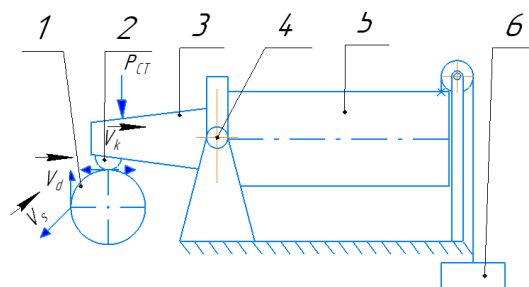


Рисунок 1. УЗПД по тангенциальной схеме: 1 – обрабатываемая деталь, 2 – индентор, 3 – волновод, 4 – ось качания, 5 – магнитострикционный преобразователь, 6 – груз,  $P_{CT}$  – статическая нагрузка,  $V_s$  – вектор скорости подачи индентора,  $V_d$  – вектор окружной скорости детали,  $V_k$  – вектор колебательной скорости индентора

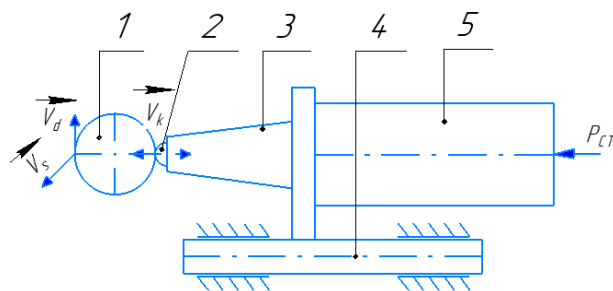


Рисунок 2. УЗПД по нормальной схеме: 1 – обрабатываемая деталь, 2 – индентор, 3 – волновод, 4 – направляющая, 5 – магнитострикционный преобразователь,  $P_{ст}$  – статическая нагрузка,  $V_s$  – вектор скорости подачи индентора,  $V_d$  – вектор окружной скорости детали,  $V_k$  – вектор колебательной скорости индентора

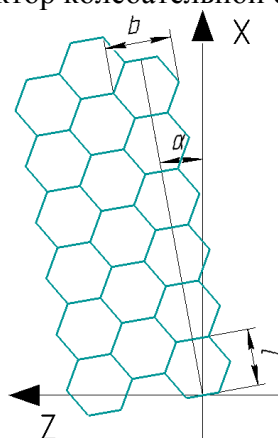


Рисунок 3. Траектория следа обработки по нормальной схеме УЗПД:  $\alpha$  – угол наклона траектории следа к длине окружности детали;  $b$  – ширина следа (единичного пластического отпечатка);  $l$  – расстояние между одноимёнными точками следа

Из рис. 3 видно, что характер следа поверхности будет определяться количеством воздействий (ударов) деформатора на единицу поверхности детали и границами их пересечений.

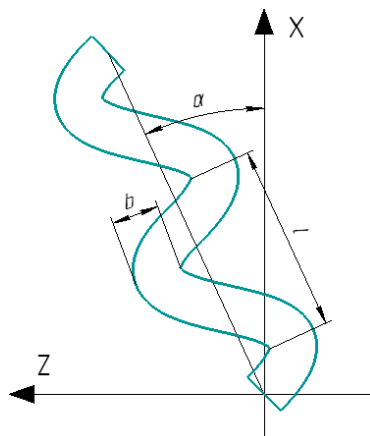


Рисунок 4. Траектория следа обработки по тангенциальной схеме УЗПД:  $\alpha$  – угол наклона траектории следа к длине окружности детали;  $b$  – ширина отпечатка обработки;  $l$  – расстояние между одноимёнными точками следа



УЗПД по касательной схеме формирует след в виде синусоиды (см. рис. 4) параметры которой будут определяются, в основном, соотношением скорости детали к колебательной скорости инструмента и их направлениями.

**Особенности формируемой геометрии после УЗПД**

При этом траектория перемещения индентора по обрабатываемой детали описывается системой уравнений [8]

$$\begin{cases} Z = V_s t + A_0 \sin(2\pi f t) \sin\beta & (1) \\ X = V_v t + A_0 \sin(2\pi f t) \cos\beta & (2) \end{cases}$$

где  $A_0$  – амплитуда колебаний (мкм),  $f$  – частота колебаний,  $t$  – время (с),  $\beta$  – угол ввода колебаний

Из широко применяемых методов ППД УЗПД по тангенциальной схеме наиболее близко, по кинематическим параметрам, с процессом алмазного выглаживания (АВ). При АВ тел вращения формируемая микрогеометрия определяется шириной следа инструмента на одном обороте детали и подачи, создание полностью нового микрорельефа возможно при соблюдении условия  $S$  (подача)  $\leq b$  (рис. 5).

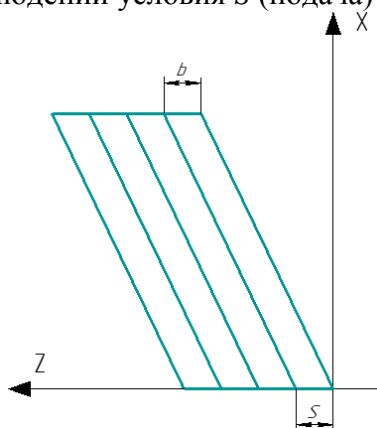


Рисунок 5. Расположение следов АВ, при условии формирования нового рельефа поверхности.

Применение УЗПД по касательной приводит к формированию более сложного следа на поверхности детали, характеристика которого кроме главной скорости и подачи будет определяться величиной амплитуды колебаний ( $2A$ ) и углом  $\beta$  (рис. 6).

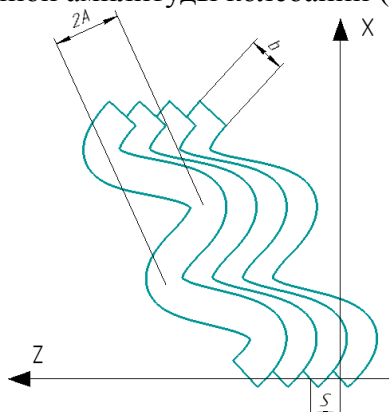


Рисунок 6. Расположение следов обработки УЗПД по касательной схеме, при условии формирования нового рельефа поверхности

Для экспериментальных исследований были подготовлены образцы из сплавов Д16 (34 HV) и Д16Т (57 HV). Выбор данных материалов аргументирован тем, что данные материалы широко применяются в авиационной, космической и приборостроительной отрасли, и анализ полученных результатов поможет можно использовать при обработке металлов и сплавов, схожих по твёрдости.

Образцы предварительно обтачивались на токарном станке 16К20 с режимами обработки  $S = 0,054$  мм/об, скорость обработки -  $V = 20$  м/мин, глубина резания -  $t = 0,5$  мм. Формируемая поверхность образцов обладала следующими параметрами: Д16 –  $Ra = 1,181$  мкм,  $Rz = 5,533$  мкм; Д16Т –  $Ra = 0,954$  мкм,  $Rz = 5,333$  мкм. УЗПД проводилось на базе токарного станка по схеме с вводом колебаний по касательной к обрабатываемой детали.

Ультразвуковые колебания генерировались с помощью ультразвукового генератора ИЛ10-1.0 и магнестрикционного преобразователя с рабочей частотой 18 кГц. Инденторы были выполнены из синтетических алмазов типа АСПК, с радиусом 4 мм. Параметры обработки варьировались в следующих пределах:  $P_{СТ} = 20...120$  Н;  $V = 28...226$  м/мин. Постоянные параметры:  $2A_0 = 20$  мкм; диаметр обрабатываемых образцов  $D_{Д16} = 50$  мм,  $D_{Д16Т} = 45$  мм.

Профилограммы были получены при помощи профилографа-профилометра модели Mahr Mar Surf PS 10. Фотографии поверхности получены с помощью оптического микроскопа Axiovert 40 MAT, с увеличением  $\times 25$ . Определение микротвёрдости проводилось на микротвердомере ПМТ-3М.

#### Результаты исследований

В работе исследовались зависимости изменения состояния поверхностного слоя деталей, по параметрам шероховатости  $Ra$  и  $Rz$ , а также микротвёрдости HV, от скорости обработки, статической нагрузки. Данные, полученные после УЗПД, сравнивались с результатами после АВ.

Ниже приведены графики зависимостей изменения параметра  $Ra$  обработанных образцов из сплавов Д16 и Д16Т при варьировании параметрами скорости обработки и прилагаемой нагрузки (рис. 7-10). Кривые строились с помощью линии тренда по полученным значениям.

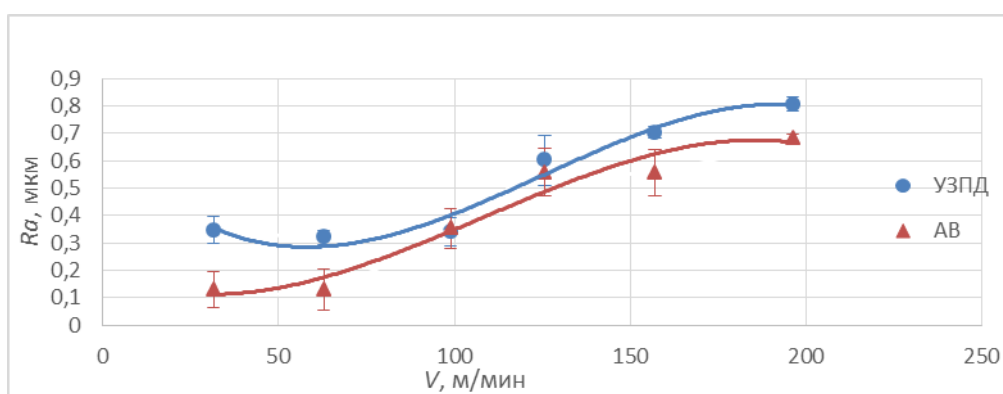


Рисунок 7. Влияние изменения скорости обработки УЗПД и АВ на значение  $Ra$  образцов из сплава Д16 (Постоянные параметры обработки:  $S = 0,1$  мм/об;  $P_{СТ} = 80$  Н)

Из графика на рис. 7 видно, что увеличение скорости обработки ( $V$ ) при УЗПД до 100 м/мин практически не приводит к увеличению шероховатости по параметру  $Ra$ .

Увеличение скорости обработки выше 62 м/мин при алмазном выглаживании, в свою очередь, существенно повышает этот параметр.

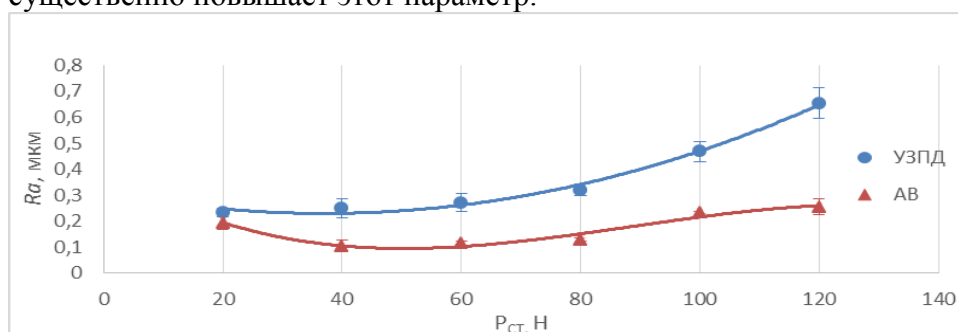


Рисунок 8. Влияние прилагаемой нагрузки при УЗПД и АВ на значение  $Ra$  образцов из сплава Д16 (Постоянные параметры обработки:  $S = 0,1$  мм/об,  $V = 62,8$  м/мин)

Анализ рис. 8 позволяет сделать вывод о том, что даже нагрузке в 20 Н достаточно для того, чтобы сгладить исходную шероховатость (в пределах исходной). Увеличение нагрузки выше 60 Н нецелесообразно, так как ведёт к обильному течению материала и росту параметра  $Ra$ . Дополнительным выводом из графика является то, что полученные значения шероховатости при УЗПД выше значений, полученных при алмазном выглаживании, за счёт более активного перемещения материала в поверхностном слое.

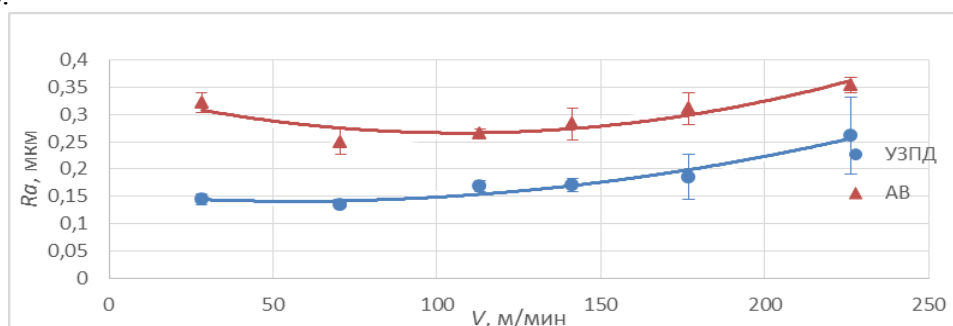


Рисунок 9. Влияние изменения скорости обработки УЗПД и АВ на значение  $Ra$  образцов из сплава Д16Т (Постоянные параметры обработки:  $S = 0,1$  мм/об;  $P_{ст} = 80$  Н).

Результаты, представленные на рисунке 9, говорят о том, что применение скоростей обработки при УЗПД до 175 м/мин позволяют достигать шероховатости поверхности, по параметру  $Ra$  на уровне процесса АВ, достигаемого только при  $V$  в районе 70 м/мин. Данные особенности позволяют проводить конечный этап обработки с большей производительностью.

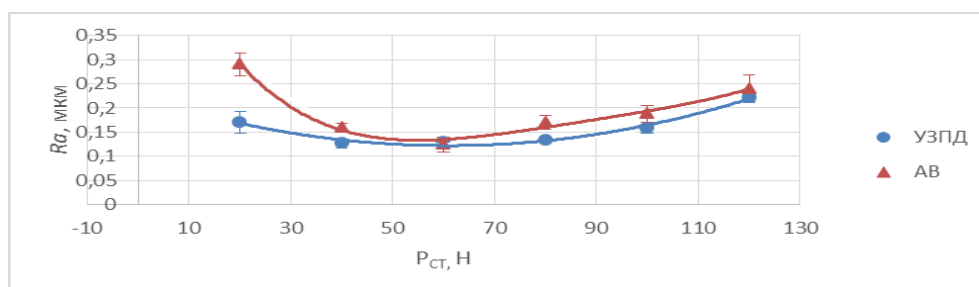


Рисунок 10. Влияние прилагаемой нагрузки при УЗПД и АВ на значение  $Ra$  образцов из сплава Д16Т (Постоянные параметры обработки:  $S = 0,1$  мм/об,  $V = 70$  м/мин).

Исходя из графика (рис. 10) оптимальной нагрузкой при УЗПД сплава Д16Т является её значение в пределах от 40 до 80 Н. Этот факт говорит о том, что обработка данного материала применима в более широком диапазоне, относительно процесса АВ.

Профилограммы поверхностей образцов приведены до и после УЗПД приведены на рис. 11-14.

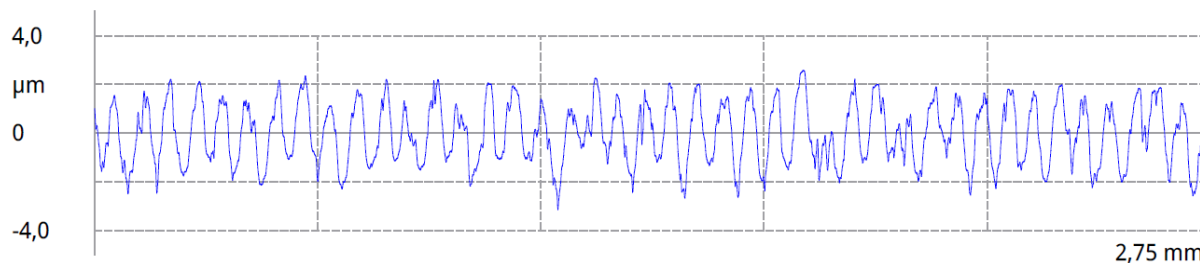


Рисунок 11. Профилограмма исходной поверхности образца из сплава Д16 (вертикальное увеличение 2 мкм/дел; горизонтальное 0,55 мм/дел).

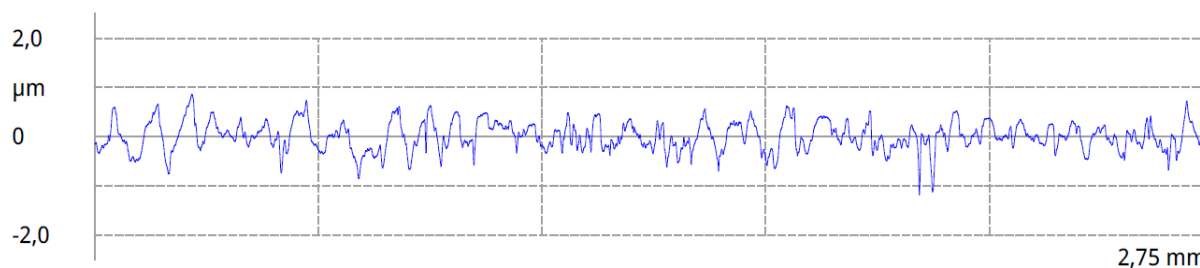


Рисунок 12. Профилограмма поверхности образца из сплава Д16 после УЗПД на режимах:  $P_{CT} = 40$  Н,  $V = 62,8$  м/мин,  $S = 0,1$  мм/об (вертикальное увеличение 1 мкм/дел; горизонтальное 0,55 мм/дел).

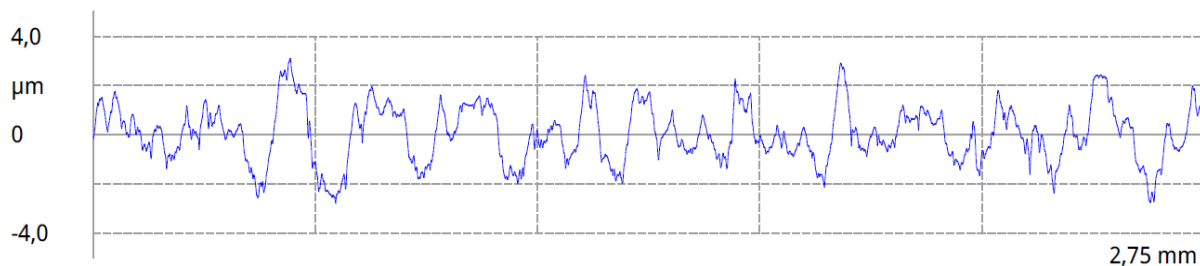


Рисунок 13. Профилограмма исходной поверхности образца из сплава Д16Т (вертикальное увеличение 2 мкм/дел; горизонтальное 0,55 мм/дел).

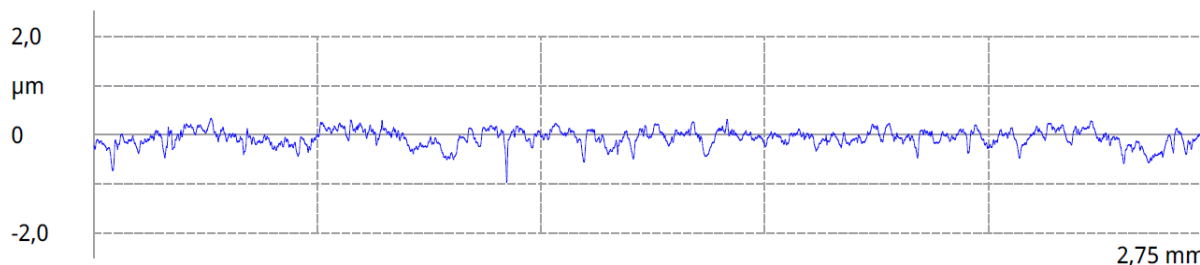


Рисунок 14. Профилограмма поверхности образца из сплава Д16Т после УЗПД на режимах:  $P_{CT} = 40$  Н,  $V = 70$  м/мин,  $S = 0,1$  мм/об (вертикальное увеличение 1 мкм/дел; горизонтальное 0,55 мм/дел).

Результаты, приведённые на профилограммах (рис. 11-14) указывают на то, что применение ультразвукового поверхностно-пластического деформирования по тангенциальной схеме позволяет уменьшать исходную шероховатость поверхности. В случае с обработкой сплава Д16 не наблюдается значительного изменения шаговых параметров (по сравнению с исходным), при уменьшении высоты неровностей. Применение УЗПД при обработке образца из Д16Т, на приведённом режиме, помимо снижения высотных характеристик также существенно изменяет средний шаг микронеровностей.

Особенности строения поверхности после УЗПД и АВ изучались с помощью металлографических исследований.

Результаты оптических исследований приведены на рис. 15.

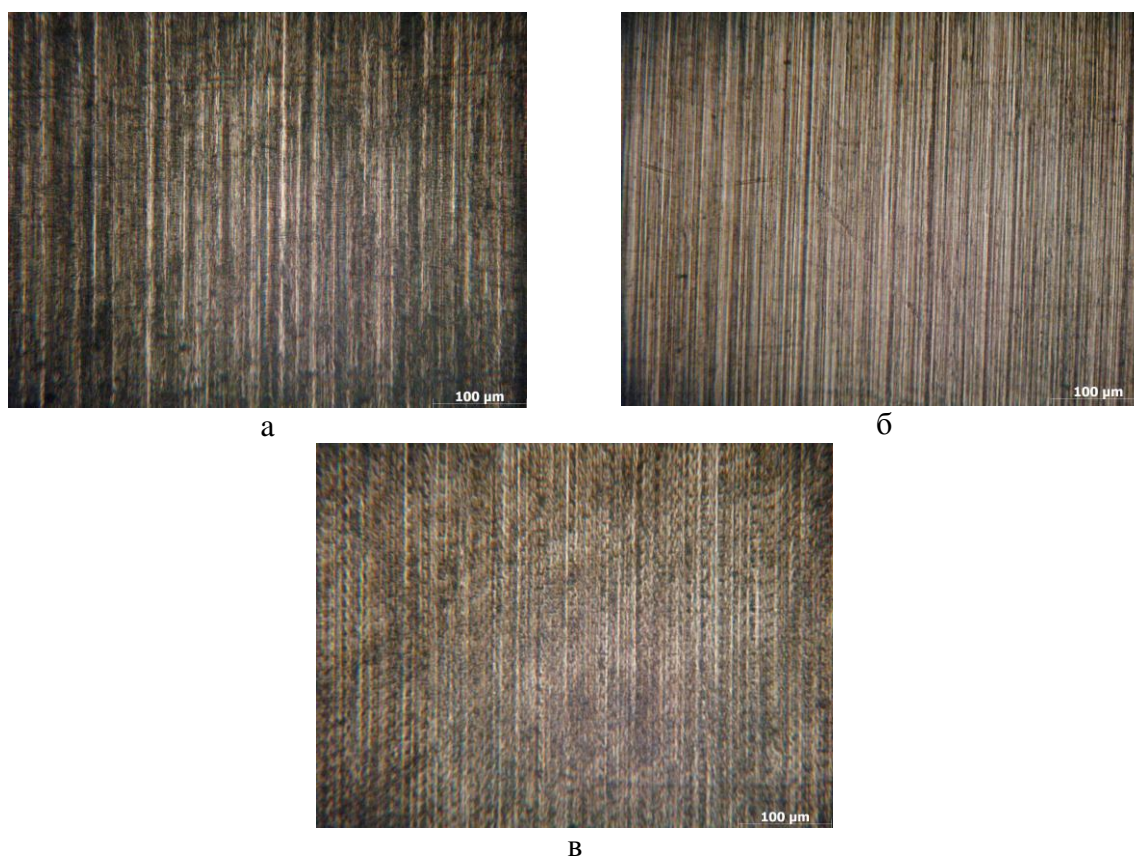


Рисунок 15. Поверхности образцов из Д16Т до и после обработки  
а) исходная поверхность; б) АВ ( $P_{CT} = 60$  Н,  $S = 0,1$  мм/об;  $V = 70$  м/мин);  
в) УЗПД по касательной схеме ( $P_{CT} = 60$  Н,  $S = 0,1$  мм/об;  $V = 70$  м/мин)

Анализ приведённых фотографий говорит о том, что при обработке как алмазным выглаживанием, так и ультразвуковым поверхностно-пластическим деформированием происходит сглаживание неровностей исходной поверхности. Дополнительно можно отметить тот факт, что применение УЗПД приводит к более полной деформации обрабатываемого слоя и при этом формируется специфичная микрогеометрия, имеющая регулярное ячеистое строение.

### Заключение

Применение ультразвукового поверхностно-пластического деформирования по схеме с вводом колебаний по касательной к обрабатываемой поверхности позволяет

формировать стабильное геометрическое и физико-механическое состояние поверхностного слоя, с микрогеометрией, имеющей специфическое регулярное строение и малые значения высотных параметров.

Более полное сглаживание исходного профиля при УЗПД достигается при меньших значениях  $P_{СТ}$ , по сравнению с АВ.

Минимальные значения шероховатости ( $Ra = 0,25$  мкм,  $Rz = 1,667$  мкм) для сплава Д16 реализуются на режимах УЗПД -  $V =$  от 30 до 100 м/мин,  $P_{СТ} =$  от 20 до 60 Н, а для сплава Д16Т ( $Ra = 0,126$  мкм,  $Rz = 0,94$  мкм) - при  $V =$  от 30 до 175 м/мин,  $P_{СТ} =$  от 40 до 80 Н.

### **Благодарности**

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-31-90059.

### **ЛИТЕРАТУРА:**

1. Yang Bai, Ming Yang, The influence of superimposed ultrasonic vibration on surface asperities deformation, *Journal of Materials Processing Technology*. – 2016. – P. 367-374.
2. Степанова, Т. Ю. Технологии поверхностного упрочнения деталей машин: учебное пособие / Т.Ю. Степанова. – Иваново; Иван. гос. хим.-технол. ун-т, 2009. – 64с.
3. S.Kumar, C.S.Wu, G.K.Padhy, W. Ding. Application of ultrasonic vibrations in welding and metal processing: A status review, *Journal of Manufacturing Processes*, 2017. – P. 295-322.
4. X. Yang et al. / *International Journal of Fatigue* 61 (2014). P. 28-38.
5. I. A.Telkov. The Structure of the Surface Roughness, Treated by Surface Plastic Deformation to Facilitate its Calculation, *Procedia Engineering*, 2015. – P. 981-986.
6. Одинцов, Л. Г. Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием: справочник / Л. Г. Одинцов. – М.: Машиностроение, 1987. – 328 с.
7. M.-s. Kim, et al. *Journal of Materials Processing Tech.* 277 (2020) 116420.
8. K. Rakhimyanov, V. Gileta and A. Samul. Kinematics of ultrasonic processing, *ICMTMTE 2020 IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 971 (2020) 022054 IOP Publishing doi:10.1088/1757-899X/971/2/022054.

Поступила в редколлегию 14.03.2021 г.



**В. А. Сидоров**, д. т. н., профессор, **Е. В. Ошовская**, к. т. н., доцент, **Ю. А. Шамрай**  
Донецкий национальный технический университет, ДНР  
E-mail: [joukserin@gmail.com](mailto:joukserin@gmail.com)

## УРОВНИ И ЗАДАЧИ ВИЗУАЛЬНОГО ОСМОТРА ПРИ ОЦЕНКЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ГИДРОПРИВОДА

*В статье рассмотрено техническое диагностирование как основа для определения оценки текущего состояния и прогнозирования изменения технического состояния оборудования, также возможно определения причин повреждений. Сделан акцент на визуальных осмотрах, предложено использование карт осмотров, для оценки технического состояния. Рассмотрено влияние вида износа и способы проведения визуального осмотра.*

**Ключевые слова:** диагностика, визуальный осмотр, гидропривод, техническое обслуживание, ремонт.

**V. A. Sydorov, E. V. Oshovskaya, Yu. A. Shamray**

## LEVELS AND OBJECTIVES OF VISUAL INSPECTION IN THE ASSESSMENT OF TECHNICAL CONDITION ELEMENTS OF THE HYDRAULIC DRIVE

*The article discusses technical diagnostics as a basis for determining the assessment of the current state and predicting changes in the technical condition of the equipment, as well as the possible determination of the causes of damage. An emphasis is made on visual inspections, it is proposed to use inspection maps to assess the technical condition. The influence of the type of nose and methods of visual inspection are considered.*

**Keywords:** diagnostics, visual inspection, hydraulic drive, maintenance, repair

Среди методов технического диагностирования визуальный осмотр занимает особое положение. Практически каждый ремонт начинается после замеченных при визуальном осмотре отклонений в работе механизма и заканчивается идентификацией видов повреждений для определения их причины. В тоже время, являясь субъективным методом визуальный осмотр трудно формализуем, что снижает его эффективность в условиях цифровизации [1, 2] четвертой промышленной революции [3, 4]. Наибольшее распространение в промышленности находит гидравлический привод, например, в металлургических, строительных, дорожных машинах и др.

Известно большое количество работ по расчётам, описанию конструкций, анализу работы гидравлических элементов [5...11]. Вопросы эксплуатации гидравлического оборудования рассматриваются гораздо реже [12, 13]. Часто в правилах технической эксплуатации ограничиваются, относительно неисправностей гидравлического оборудования, кратким перечнем проявлений неисправностей: отсутствие давления, вибрация, сильный нагрев, утечки масла, разрушение элементов, повышенный шум и др. Работ по систематизации визуальных признаков проявления дефектов эксплуатируемого гидравлического оборудования практически нет.

В работе поставлена цель сформировать уровни и определить задачи визуального осмотра относительно признаков повреждения гидропривода холодильника МНЛЗ, как наиболее характерного примера машины с гидравлическим приводом, реализуемым при использовании гидроцилиндров, работающих в повторно-кратковременном режиме постоянного силового нагружения.

Признаки проявления технического состояния механического оборудования и гидравлического в частности, при техническом диагностировании используются для



решения следующих задач: оценка текущего состояния; прогнозирование изменения состояния; определение причин повреждения.

Относительно указанных задач визуальный осмотр может проводиться: внешний – в статическом или динамическом режиме; внутренний – с частичной или полной разборкой (рис. 1). По назначению осмотры можно разделить на: эксплуатационные; специализированные; экспертные [14]. Процесс осмотра включает три стадии: подготовительную, рабочую и завершающую. Также выделяют: предварительный обзор, общий и детальный осмотр [14]. Осмотр может проводиться с использованием оптических устройств, включая приборы освещения или без них [15].

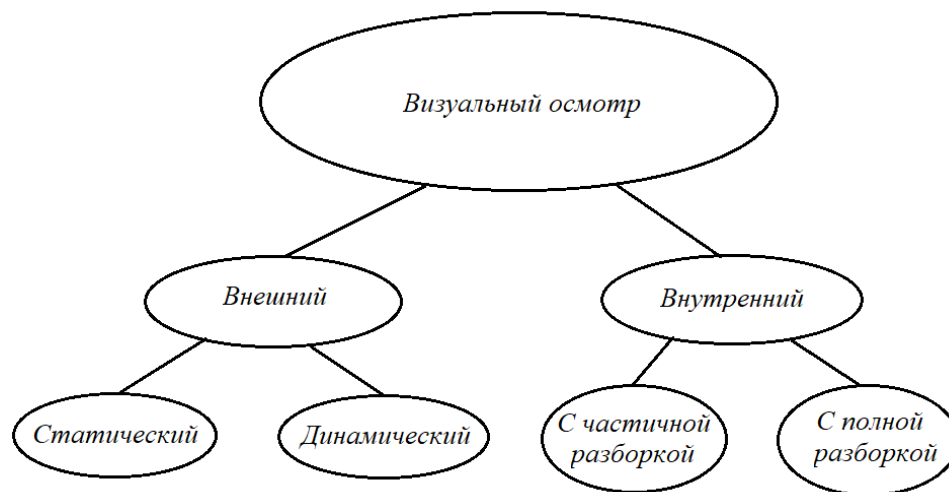


Рисунок 1. Визуальный осмотр механического оборудования.

В данной работе исследуются диагностические признаки повреждений относительно элементов гидравлического привода и решаемых диагностических задач. При этом предполагается использование оптических устройств.

В самом общем случае, механизмы с гидравлическим приводом включают следующие элементы: силовой блок (включающий насосы, бак с рабочей жидкостью, гидроаккумуляторы), управляющая и регулирующая аппаратура, трубопроводы (жесткие и гибкие), гидроцилиндры вертикального подъема и горизонтального перемещения, элементы исполнительного механизма (подвижные балки, кронштейны, плиты трения, резьбовые соединения и др.). В случае гидропривода холодильника МНЛЗ необходимо добавить делители потока. Относительно данных элементов в дальнейшем рассматриваются признаки повреждений доступные при визуальном осмотре.

*Внешний визуальный осмотр остановленного оборудования* (статический режим) позволяет выявить: утечки рабочей жидкости и пластичной смазки, ослабления крепления трубопроводов и резьбовых соединений крепления гидроцилиндров, трещины и вид износа трущихся деталей. Используемые средства – переносной светодиодный источник освещения в цеховом исполнении, в ударопрочном корпусе, обеспечивающий уровень освещенности не менее 500 лк, имеющий возможность переключения общего или локального сектора осмотра, обеспеченность креплением и др. Карта осмотра (рис. 2) формируется по координатно-объектному расположению механизмов и дополняется формируемым сообщением, включающим дату, место повреждения и степень развития.

В конструкции холодильника с шагающими балками выделено три основных зоны осмотра: насосный агрегат, включающий бак с рабочей жидкостью, насосы, гидроаккумуляторы, аппаратуру управления и трубопроводы; делители потока, включая трубопроводы; механизм шагания, включая гидроцилиндры вертикального подъёма и горизонтального перемещения, трубопроводы, балки подвижные и неподвижные, фундаменты, плиты трения, трубопроводы и др.

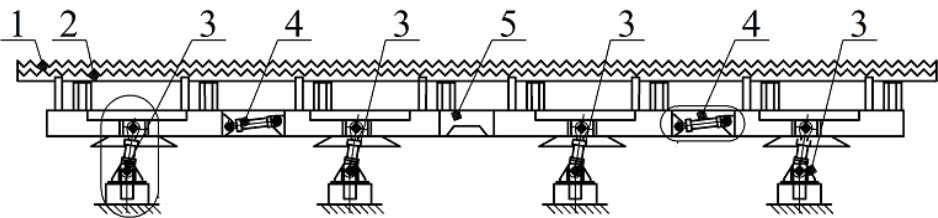
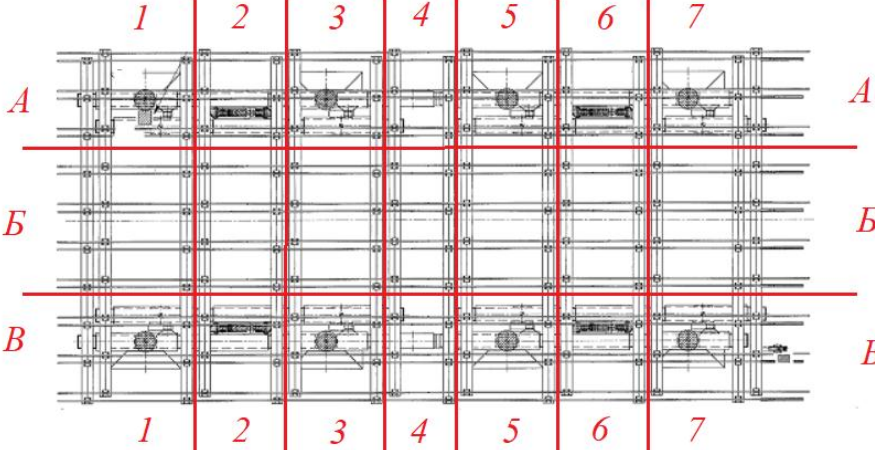
				Дата осмотра
				
Место расположения	Объект	Вид повреждения	Степень повреждения	Действие

Рисунок 2. Пример карты осмотра.

Осмотр проводится с заданной периодичностью (ежедневно, еженедельно), формируемые сообщения шифруются и анализируются по повторению и качеству проведенных ремонтных воздействий. Современные технологии позволяют использовать для этой цели смартфоны и планшеты (рис. 3).

*Внешние утечки* являются наиболее распространённым видом повреждений систем с гидравлическим приводом. Обнаруживаются по тёмным пятнам рабочей жидкости на сером фоне. Различают мокрение, образование капли и капель. Устраняются – затяжкой фитингов, заменой уплотнений или гибких рукавов, восстановлением жёстких трубопроводов. Часто причиной появления течи является износ уплотнений.

Пятна рабочей жидкости, пластичных смазок, устраняются смыванием при отключенном оборудовании растворителем, на бетонных элементах устраняются засыпкой песка или окалины с последующим удалением загрязнённого слоя и подливкой.

*Ослабления крепления трубопроводов и резьбовых соединений* обнаруживается по наличию чётких линий по сопряжению деталей, потёртостей или наличию порошка

красного цвета. Дополнительно, ослабление резьбовых соединений проверяется простукиванием. Внутренние усталостные трещины визуальным осмотром не обнаруживаются. Затяжка болтов должна проводиться при проведении профилактических работ во время технологической паузы, а не при осмотре. Возможное разрушение болтов при этом, может быть причиной остановки агрегата.

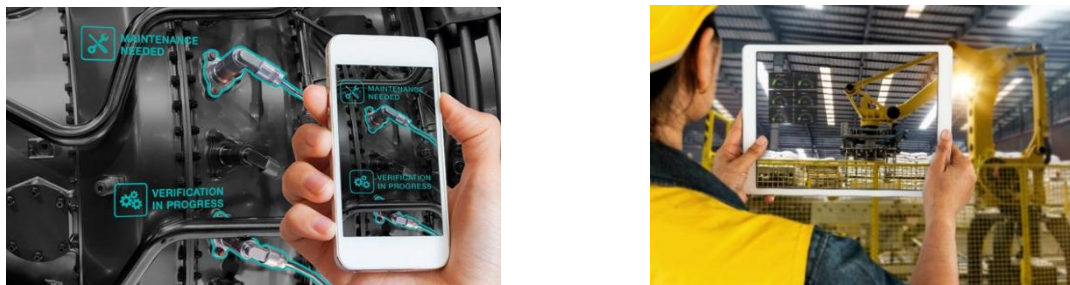


Рисунок 3. Примеры использования смартфонов и планшетов для получения данных при визуальном осмотре оборудования.

*Трещины в элементах металлоконструкций* фиксируются после выхода их на поверхность и контролируются по длине (скорости развития). Различаются трещины подвижных и неподвижных балок, кронштейнов, элементов металлоконструкций, фундаментных элементов и др. Подвержены появлению трещин трубные разводки, точки врезки и привязки элементов трубопроводов. В местах контакта с раскалённым металлом возможно возникновение термических трещин. Восстановление металлических элементов возможно после засверливания разрушающего клина трещины, разделки краёв и заварки.

*Вид износа трущихся поверхностей* фиксируется на плитах трения, поверхностях балок, контактирующих с заготовками. Различают места пластической деформации, абразивного и окислительного износа, схватывания первого рода. Одновременно фиксируется значение (скорость) износа.

*Проверка сварных швов* проводится для подтверждения их целостности, особенно в местах подверженных повышенным воздействиям динамических нагрузок. Возникновению трещин на фланцевых соединениях трубопроводов способствуют вибрации рабочей жидкости при повышении давления. Ударные нагрузки при кантовке слитков приводят к появлению трещин на элементах несущих конструкций, защитных и оградительных элементах.

*Дополнительно*, на баке с рабочей жидкостью фиксируется уровень, наличие пены и оценивается цвет. Несмотря на работу при повышенной температуре, наличие раскалённого металла в некоторых случаях на элементах механизмов, металлоконструкций, трубопроводов возможно образование коррозии. Оценка степени коррозии проводится подсчётом числа пятен коррозии на единицу площади.

Результаты плановых и внеплановых осмотров, а также обнаружение неисправностей технологическим или дежурным персоналом формирует сообщение. Повторное сообщение, возникающее при отсутствии положительного результата по устранению неисправности приводит к возникновению ситуации, которая разрешается путём трансформации после проведения ремонтных операций во время технологических пауз или планового времени ремонта. Качество проведенной трансформации подтверждает-

ся последующим сообщением. Повторное сообщение о неисправности передаётся в разряд нерешённых задач, требующих не традиционного инженерного решения.

*Визуальный осмотр в динамическом режиме* позволяет выполнить ряд проверок общего состояния отдельных элементов гидропривода. Проводится ежемесячно механиком установки по согласованию (по необходимости) с технологическими или сервисными службами (автоматики, гидравлики и др.). Используемое оборудование – переносные или стационарные видео камеры, манометры, секундомеры и др. Выполняемые проверки:

1. Определение траектории движения шагающих балок – может выполняться по нескольким методикам. Предполагается использовать возможности камер видеонаблюдения совмещённых с программной обработкой изображения.

В результате – полученная траектория сравнивается с эталонной (рис. 4) и принимается решение о продолжении эксплуатации или проведения ремонта. Обычно – это замена гидроцилиндра.

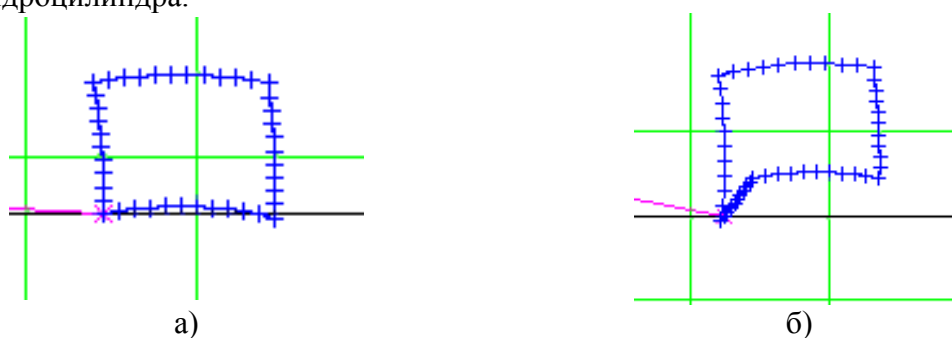


Рисунок 4. Эталонная (а) и траектория движения шагающих балок с отклонениями (б).

2. Определение времени срабатывания гидроцилиндров, выполняется по данным системы автоматизации (рис. 5) и проверяется вручную при помощи секундомера. Из гистограмм следует относительная равномерность опускания цилиндров – различие во времени срабатывания не превышает 2...3 секунд. Время подъёма по цилиндрам имеет ощутимую разницу до 4...6 секунд. Фактическое время подъёма и опускания цилиндров, измеренное хронометром, примерно равно паспортному – 4 с. Отсюда следует вывод о возможных ошибках в работе средств автоматизации.

Данная проверка позволяет оценить возникающие дополнительные сопротивления, возникающие при работе гидроцилиндров и равномерность нагружения металлоконструкций. Одновременно проверяется плавность движения штоков гидроцилиндров.

3. Анализ циклограммы движения шагающих балок по данным системы автоматизации. Фактический цикл движения включает этапы: движение вверх, движение вперед, торможение, период колебаний, движение вниз, движение назад, торможение, возвращение в исходную позицию (рис. 6).

На рис. 6 указаны характерные точки движения холодильника: 1<sup>/</sup> - задание «начало движения вверх», 1 - фактическое «начало движения вверх», 2<sup>/</sup> - задание «окончание движения вверх – начало движения вперед», 2 – фактическое «окончание движения вверх – начало движения вперед», 3<sup>/</sup> - задание «начало торможения движения вперед», 3 – фактическое «начало торможения движения вперед», 4<sup>/</sup> - задание «окончание торможения – начало движения вниз», 4 – фактическое «окончание торможения – начало движения вниз», 5<sup>/</sup> - задание «окончание движения вниз – начало движения назад», 5 –

фактическое «окончание движения вниз – начало движения назад»,  $6^l$  - задание «начало торможения движения назад»,  $6$  – фактическое «начало торможения движения назад»,  $7^l$  - задание «окончание торможения движения назад – окончание движения назад»,  $7$  – фактическое «окончание торможения движения назад – окончание движения назад».

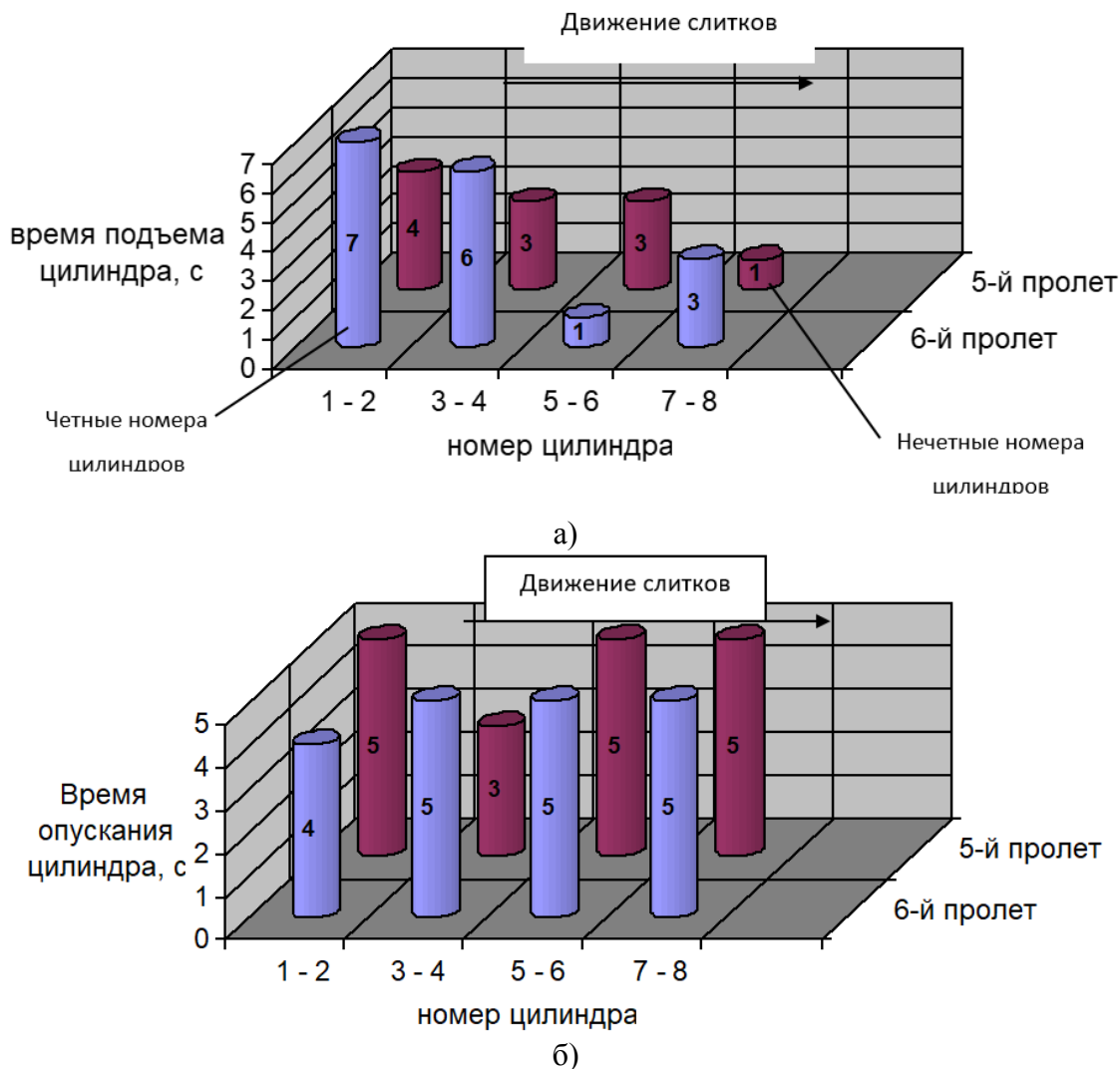


Рисунок 5. Время подъёма (а) и опускания (б) гидроцилиндров шагающих балок.

Математическая обработка полученных данных позволяет оценить скорость движения шагающих балок. Это реализуется в сопроводительной экспертной системе.

4. Наблюдение за динамикой набора и снижения давления по показаниям манометра, установленного в контрольной точке отбора давления, позволяет оценить равномерность работы всей системы. Установка датчиков давления и запись результатов измерения обеспечивает графическую фиксацию циклов нагружения. Сравняется продолжительность циклов и стабильность значений давления по этапам шагания. Пример графика изменения параметров давления в полостях гидроцилиндра приведен относительно механизма поворота свода электродуговой печи (рис. 7).



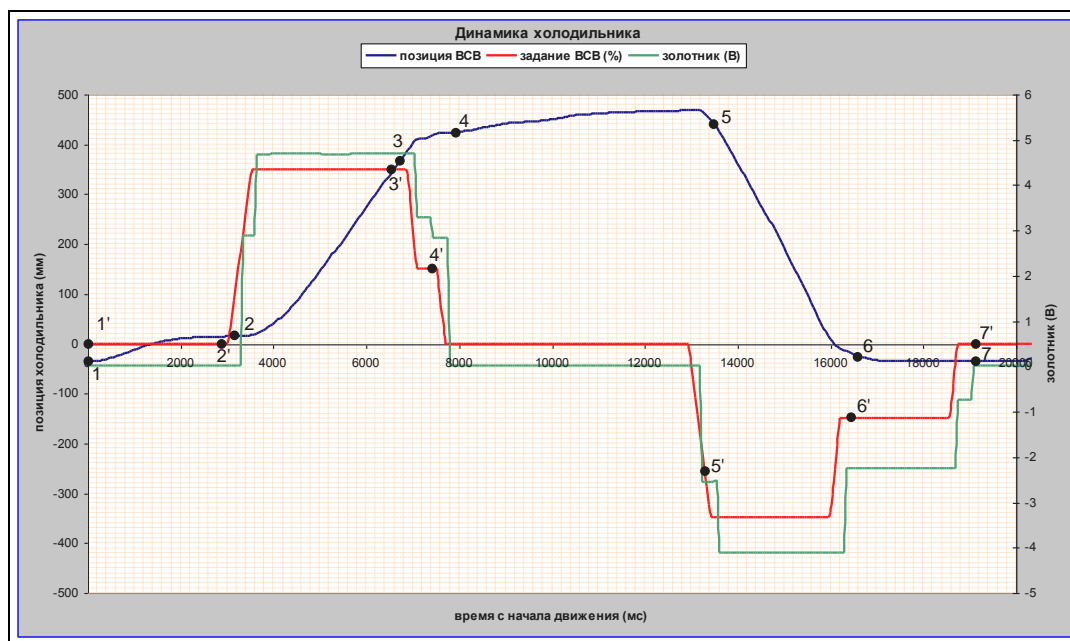


Рисунок 6. Динамика, характерные точки и этапы движения холодильника.

5. Фиксация времени включения в рабочий режим насосов, при стационарном режиме работы, обеспечивает возможность косвенно оценить объёмный КПД установки. Основным параметром гидравлического привода, характеризующим его техническое состояние, является объёмный КПД – отношение подачи насоса при номинальном давлении к теоретической подаче.

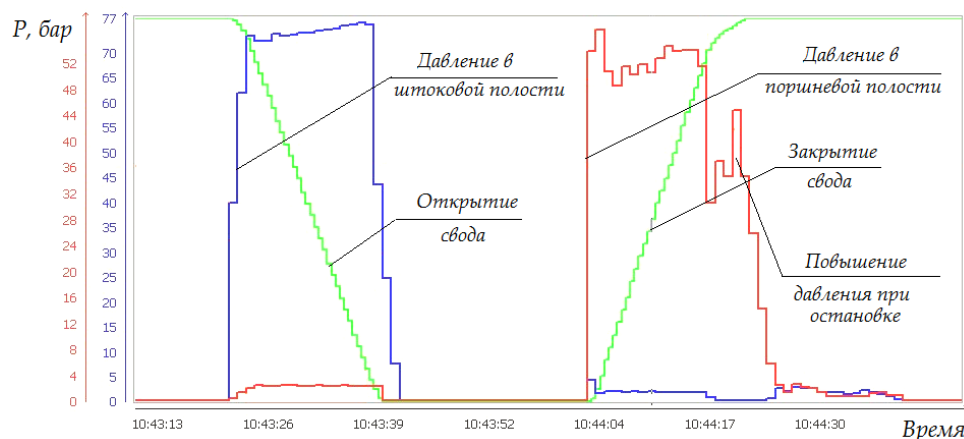


Рисунок 7. График движения свода и параметры давления в полостях гидроцилиндра.

Работа насоса происходит в режимах рабочего и холостого хода. Увеличение внутренних утечек в исполнительной части установки или в насосе приводит к более частому включению насоса, что может быть зарегистрировано при постоянных наблюдениях. Утечки исполнительной части – гидроцилиндров вертикального подъёма и горизонтального перемещения могут быть определены по падению давления в статическом режиме.

*Визуальный осмотр при частичной разборке* выполняется в период подготовки к капитальному ремонту для уточнения его объёмов. При этом могут применяться видео-эндоскопы для осмотра внутренних полостей элементов гидропривода. Основная задача – определение видов износа и состояния поверхности (рис. 8).

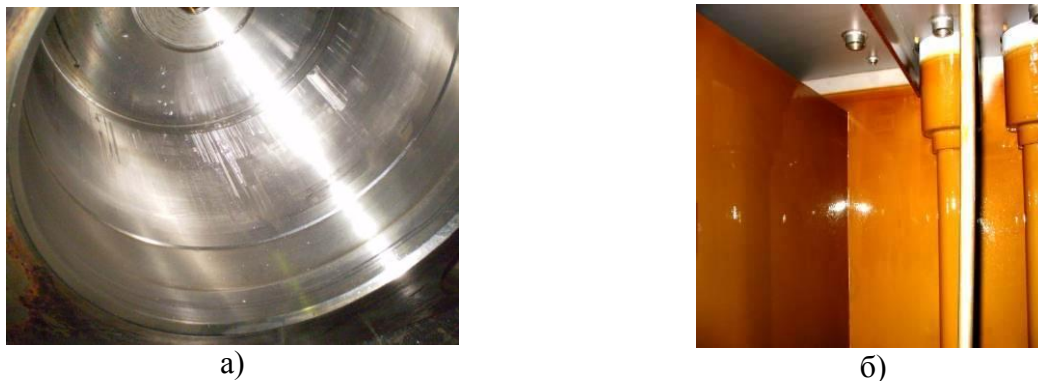


Рисунок 8. Результаты осмотра: а) на внутренней поверхности гидроцилиндра; б) лаковые отложения внутри масляного бака

*Визуальный осмотр при полной разборке* проводится во время капитального ремонта для дефектовки деталей и для определения видов и причин механического износа (рис. 9).

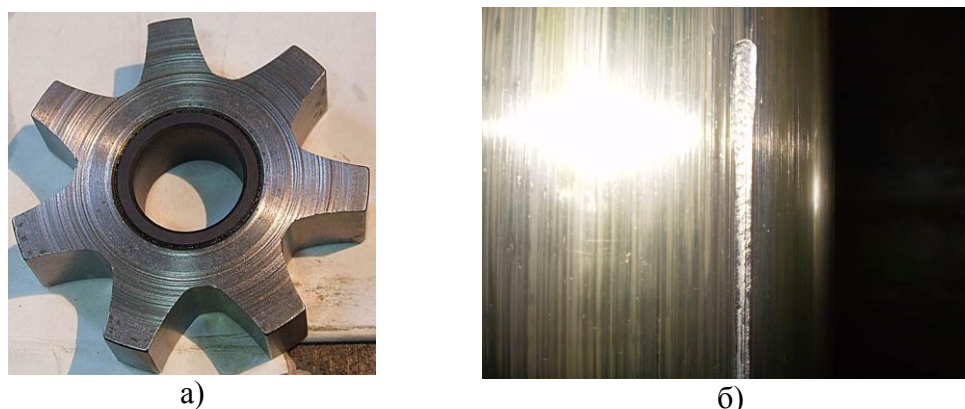


Рисунок 9. Виды механического износа элементов гидропривода: а) износ схватыванием второго рода торцевой поверхности шестерёнчатого насоса с внутренним зацеплением; б) износ схватыванием первого рода на штоке гидроцилиндра.

При дефектовке отдельных деталей используются методы неразрушающего контроля – магнитный, электрический, вихретоковый, радиоволновой, тепловой, оптический, радиационный, акустический, проникающими веществами. Возможно применение оптических устройств (лупа, микроскоп и др.) и мерительного инструмента для проверки фактических размеров.

#### **Выводы.**

1. Основным видом повреждений элементов гидравлических систем, наиболее уверенно выявляемых при визуальном осмотре являются утечки различной степени интенсивности.



2. Возможности визуального осмотра на различных этапах (внешний – в статическом или динамическом режиме; внутренний – с частичной или полной разборкой) позволяет получить необходимые данные для решения задач диагностирования на качественном уровне переходов технического состояния.

3. Эффективность применения результатов визуального осмотра обеспечивается формализацией, фиксацией выявленных неисправностей и использованием полученных данных в деятельности ремонтной службы промышленного предприятия.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Липкин, Е. Б. Индустрия 4.0: Умные технологии – ключевой элемент в промышленной конкуренции. – М.: ООО «Остек-СМТ», 2017. – 224 с.
2. Дж. Манийка и Майкл Чуй, «Гипермасштабные вызовы цифровой эры» / The Financial Times. – 13 августа 2014.
3. Шваб, К. Четвёртая промышленная революция / К. Шваб – М.: «Эксмо», 2016. – (Top Business Awards).
4. Эрик Бринйолфссон и Эндрю МакАфи, «Вторая эра машин: работа, прогресс и процветание в эпоху блестящих технологий», Изд-во W. W. Norton & Company, 2014.
5. Бодунов, А. В. Насосы, вентиляторы, компрессоры: учебное пособие. – Н.Новгород: Нижегород. гос. архит.- строит. ун-т, 2005. – 108 с.
6. Галдин, Н. С. Гидравлические схемы мобильных машин: учеб. пособие / Н. С. Галдин, И.А. Семенова. – Омск: СибАДИ, 2009. – 203 с.
7. Кирносков, А. М. Гидропривод металлургических машин: учеб. пособие / А. М. Кирносков, М. Л. Босняк. – Новокузнецк: СибГИУ, 2008. – 84 с.
8. Ефременков, А. Б. Горные машины и оборудование. Введение в специальность: учебное пособие / А. Б. Ефременков, А. А. Казанцев, М. Ю. Блащук. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009. – Ч. 1. – 152 с.
9. Тургель, Д. К. Горные машины и оборудование подземных разработок: учебное пособие / Д. К. Тургель. – Екатеринбург: Изд-во УГТУ, 2007. – 302 с.
10. Гидропривод гусеничных экскаваторов и основы его эксплуатации: метод. указания / сост.: В.П. Чмил, С.В. Репин, К.В. Рулис – СПб: СПбГАСУ, 2011. – 131 с.
11. Галдин Н. С. Элементы объемных гидроприводов мобильных машин. Справочные материалы: уч. пособие / Н.С. Галдин. – Омск: Изд-во СибАДИ, 2005. – 127 с.
12. Гидропривод. Основы и компоненты. Бош Рексрот АГ Сервис Автоматизация Дидактика 64711 г. Эрбах Германия / Х. Экснер, Р. Фрейтаг, Д-р Х. Гайс, Р. Ланг, Й. Оппольцер, П. Шваб, Е. Зумпф, У. Остендорфф, М. Райк // Пер. с нем. языка: Д. В. Горобец. Ред. рус. изд.: к. т. н. В. К. Свешников. Заказ. № RRS 00 290/2003 – 321 с.
13. Сидоров, В. А. Эксплуатация гидропривода металлургических машин [Электронный ресурс]: учебное пособие для вузов / В. А. Сидоров и [др.] – ГВУЗ "ДонНТУ". 14 Мб. – Донецк: [б.и.], 2015.– 252 с.1 файл. Систем. требования: Acrobat Reader. - ISBN 978-966-374-255-7. <http://ed.donntu.org/books/cd3154.pdf>
14. Зданевич, В. Е. Осмотр механического оборудования как метод технической диагностики / В. Е. Зданевич, В. А. Сидоров // Журнал «Техническое Обслуживание и Ремонт». – 2010. – №4. - С. 12-18.
15. Кравченко, В.М. Визуальное диагностирование механического оборудования / В. М. Кравченко, В. А. Сидоров. – Донецк: ООО «Юго - Восток, Лтд», 2004. - 120 с.

Поступила в редколлегию 23.03.2021 г.

УДК 621.838.222

**М. П. Шишкарев**, д-р техн. наук, доцент

Донской государственной технической университет, Российская Федерация

Тел.: 89081933393; E-mail: [shishkarev\\_m\\_p@mail.ru](mailto:shishkarev_m_p@mail.ru)**ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ СРАБАТЫВАНИЯ АДАПТИВНОЙ ФРИКЦИОННОЙ МУФТЫ ВТОРОГО ПОКОЛЕНИЯ (БАЗОВЫЙ ВАРИАНТ)**

*В статье приведены результаты исследования адаптивной фрикционной муфты второго поколения (базовый вариант). Применение принципа отдельного силового замыкания фрикционных групп в муфте позволило повысить значение коэффициента усиления обратной связи, при котором обеспечивается адаптивный режим работы муфты в интервале возможных значений коэффициента трения, и точность срабатывания муфты. Показано, что наибольшая точность срабатывания муфты достигается в том случае, когда значение вращающего момента, передаваемого основной фрикционной группой, обращается в ноль при максимальном значении коэффициента трения.*

**Ключевые слова:** адаптивная фрикционная муфта, второе поколение, коэффициент усиления, отдельное силовое замыкание, точность срабатывания, коэффициент трения.

**М. P. Shishkarev****IMPROVING THE ACTUATION ACCURACY OF THE SECOND GENERATION ADAPTIVE FRICTION CLUTCH (BASIC VERSION)**

*The article presents the results of the study of the adaptive friction clutch of the second generation (basic version). The application of the principle of separation of power circuit groups of the friction clutch has improved the value of the coefficient gain feedback, which provides an adaptive mode the clutch interval of possible values of the friction coefficient and accuracy actuation of the clutch. It is shown that the greatest accuracy of the coupling operation is achieved when the value of the torque transmitted by the main friction group turns to zero at the maximum value of the coefficient of friction.*

**Keywords:** adaptive friction clutch, second generation, gain factor, separate power closure, actuation accuracy, coefficient of friction.

**1. Введение**

Синтезированный в работе [1] и исследованный в работе [2] базовый вариант адаптивной фрикционной муфты (АФМ) второго поколения имеет две фрикционные группы и комбинированную – отрицательно-нулевую обратную связь. Одна фрикционная группа охвачена отрицательной обратной связью, вторая фрикционная группа не охвачена обратной связью, т. е. имеет так называемую нулевую обратную связь.

Одним из основных эксплуатационных показателей предохранительных муфт любого типа, в том числе АФМ, является точность срабатывания, которая характеризует уровень стабильности значения предельного вращающего момента, передаваемого муфтой [3]. В работе [4] показано, что точность срабатывания базового варианта АФМ второго поколения несколько выше, чем точность срабатывания АФМ первого поколения (типа муфты Н.Д. Вернера) [5].

Несмотря на это, точность срабатывания АФМ второго поколения (базовый вариант) нельзя считать достаточной для удовлетворительного решения в некоторых случаях проблем защиты приводов машин от перегрузок. Причина этого заключается в том, что максимальное значение коэффициента усиления (КУ) отрицательной обратной связи, определяющего уровень точности срабатывания АФМ, ограничено ввиду того, что оно устанавливает границу между адаптивным и неадаптивным режимами работы в пределах интервала изменения коэффициента трения между элементами фрикционных групп [6].

**Цель исследования:** Изучение и разработка способа повышения точности срабатывания базового варианта АФМ второго поколения.

**Задачи исследования:** 1. Оценка влияния раздельного силового замыкания на величину КУ обратной связи. 2. Постановка условия наибольшей точности срабатывания АФМ. 3. Оценка влияния параметров АФМ на ее точность срабатывания.

**2. Основное содержание и результаты работы**

Рассмотрим принципиальную схему АФМ, показанную на рис. 1, а. По совокупности основных конструктивно-компоновочных признаков (число фрикционных групп, связь между ними, тип обратной связи) представленный вариант муфты относится к базовому варианту АФМ второго поколения [2].

Полумуфты 1 и 2 связаны одна с другой двумя фрикционными группами:

- основной (ОФГ), состоящей из дисков трения 3 и 4;

- дополнительной (ДФГ), включающей диски трения 5 и 6.

Диски 3 и 5 соединены с барабаном полумуфты 2, диски 4 и 6 – с нажимным диском 7, который лишен непосредственной кинематической связи с полумуфтой 1.

Управляющее устройство (УУ) муфты состоит из тел качения 8,

которые расположены в гнездах с наклонными боковыми стенками, выполненных на обращенных друг к другу поверхностях нажимного диска 7 и упорного диска 9, жестко закрепленного на ступице полумуфты 1 (рис. 1, б).

Силовое замыкание элементов пар трения ОФГ и ДФГ выполнено комбинированным и осуществляется при помощи двух пружин 10 и 11. Пружина 10 замыкает только элементы пар трения ОФГ, а пружина 11 – обе фрикционные группы.

Для уменьшения влияния трения на эксплуатационные показатели АФМ – номинальную нагрузочную способность и точность срабатывания – между подвижными и неподвижными (относительной полумуфты 1) элементами установлены упорные подшипники.

Значение вращающего момента  $T$ , передаваемого муфтой, равно сумме значений двух вращающих моментов – момента  $T_1$ , равного моменту сил трения ОФГ, и момента  $T_2$ , равного моменту сил трения ДФГ, т. е.

$$T = T_1 + T_2 . \tag{1}$$

При передаче вращающего момента на пары трения ОФГ, кроме сил натяжения пружин 10 и 11, действует распорная (отжимная) сила УУ, возникающая в результате взаимодействия между телами качения 8 и наклонными боковыми стенками гнезд (рис. 1, б). На основании этого запишем:

$$T_1 = z_1 R_{cp} f (F_{n1} + F_{n2} - F_p) , \tag{2}$$

где  $z_1$  – число пар трения ОФГ;  $R_{cp}$  – средний радиус поверхностей трения ОФГ;  $f$  –

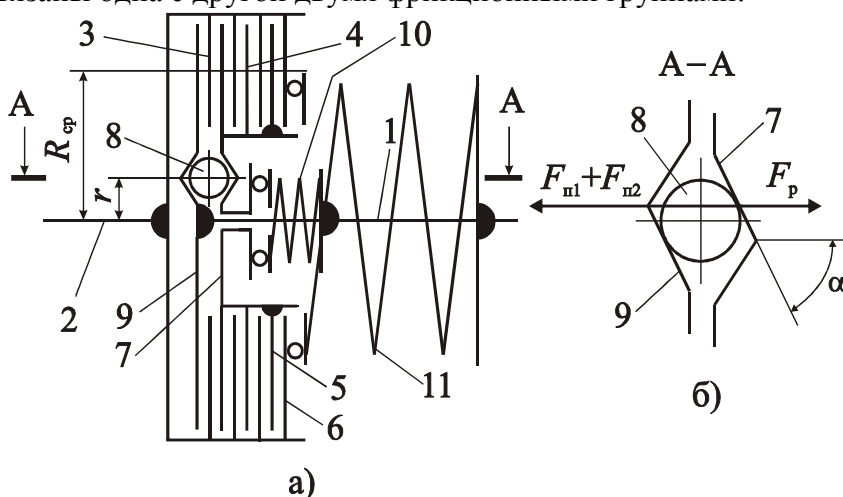


Рисунок 1. Принципиальная схема модернизированной АФМ второго поколения

коэффициент трения между элементами пар ОФГ;  $F_{n1}, F_{n2}$  – силы натяжения соответственно пружин 10 и 11;  $F_p$  – распорная (отжимная) сила УУ.

Значение вращающего момента, который передает ДФГ, определяется по следующей формуле:

$$T_2 = z_2 F_{n2} R_{cp} f, \quad (3)$$

где  $z_2$  – число пар трения ДФГ. Остальные обозначения приведены выше.

При выводе формулы (3) принято условие, заключающееся в том, что значения средних радиусов поверхностей трения элементов пар ОФГ и ДФГ одинаковы.

На пары трения ДФГ распорная сила УУ не действует до тех пор, пока  $F_p \leq F_{n2}$ .

Нажимной диск 7 передает полный вращающий момент АФМ, поэтому значение распорной силы УУ определяется по следующей формуле:

$$F_p = \frac{T}{r} \operatorname{tg} \alpha, \quad (4)$$

где  $\alpha$  – угол наклона боковой стенки гнезда под тело качения 8 (рис. 1, б, сечение А-А);  $r$  – радиус окружности, на которой расположены тела качения 8 (рис. 1, а).

Подставляя правую часть формулы (4) в формулу (2) и учитывая при этом формулы (1) и (3), находим в результате решения составленного уравнения относительно неизвестного члена  $T_1$ :

$$T_1 = z_1 R_{cp} f \frac{F_{n1} + F_{n2} - z_2 F_{n2} C f}{1 + z_1 C f}, \quad (5)$$

где  $C$  – КУ обратной связи:

$$C = \frac{R_{cp}}{r} \operatorname{tg} \alpha.$$

Подставляя правые части формул (3) и (5) в равенство (1), получаем:

$$T = R_{cp} f \frac{z_1 F_{n1} + (z_1 + z_2) F_{n2}}{1 + z_1 C f}. \quad (6)$$

Функция (6) является возрастающей по аргументу  $f$  в интервале значений коэффициента трения  $f_{\min} \dots f_{\max}$  (где  $f_{\min}, f_{\max}$  – соответственно минимальный и максимальный коэффициенты трения).

Функция (5) обращается в ноль при значении коэффициента трения, вычисляемом по соотношению:

$$f_1 = \frac{F_{n1} + F_{n2}}{z_2 C_k F_{n2}}. \quad (7)$$

Наибольшая точность срабатывания АФМ достигается в том случае, когда значение вращающего момента  $T$  при значении коэффициента трения, равном  $f_{\max}$ , будет наименьшим.

Поскольку значение вращающего момента  $T_2$  при значении коэффициента трения, равном  $f_{\max}$ , постоянное, условие минимума значения вращающего момента  $T$  будет выполняться в том случае, когда  $T_1 = 0$ , также при значении коэффициента трения, равном  $f_{\max}$ . Таким образом, при  $f_1 = f_{\max}$  из формулы (7) находим:

$$C_k = \frac{F_{n1} + F_{n2}}{z_2 F_{n2} f_{\max}}. \quad (8)$$

В данном случае значение коэффициента точности АФМ [7] вычисляется по следующей формуле:

$$K_T = \frac{T_{\max}}{T_{\min}} = \frac{f_{\max}}{f_{\min}} \times \frac{z_2 F_{n2} [1 + z_1 C f_{\min}]}{z_1 F_{n1} + (z_1 + z_2) F_{n2}}. \quad (9)$$

Из формулы (9) следует, что значение коэффициента точности уменьшается по мере уменьшения силы  $F_{n2}$ , что вытекает из формулы, полученной в результате подстановки правой части соотношения (8) в формулу (9):

$$K_T = \frac{z_1 F_{n1} + (z_1 + z_2 m) F_{n2}}{z_1 F_{n1} + (z_1 + z_2) F_{n2}}, \quad (10)$$

где  $m = f_{\max} / f_{\min}$  – коэффициент относительной ширины интервала изменения значений коэффициента трения.

Формула (10) показывает, что точность срабатывания АФМ повышается также с уменьшением числа пар трения  $z_2$  ДФГ.

Представим  $F_{n1} = n F_{n2}$  (где  $n$  – коэффициент;  $n \neq 1$ ). Тогда формулу (10) запишем в следующем виде, исключаящем силовые факторы  $F_{n1}$  и  $F_{n2}$ :

$$K_T = \frac{z_1 n + z_1 + z_2 m}{z_1 n + z_1 + z_2}. \quad (11)$$

Рассмотрим дополнительно два варианта АФМ: при  $C < C_k$  и  $C > C_k$ . При выполнении неравенства  $C > C_k$  (значение КУ  $C_k$  определяется по формуле (8)), согласно соотношению (7), справедливо неравенство  $f_1 < f_{\max}$ . Это означает, что функция (5) обратится в ноль внутри интервала  $f_{\min} \dots f_{\max}$ , а не на его верхней границе, как это имеет место при  $C = C_k$ .

Равенство  $T_1 = 0$  тождественно равенству  $F_p = F_{n1} + F_{n2}$ , т. е. в интервале значений коэффициента трения  $f_1 \dots f_{\max}$  в муфте будет действовать положительная обратная связь.

В указанном интервале вращающий момент будет передаваться парами трения ДФГ, и при увеличении коэффициента трения распорная сила УУ возрастет, что приведет к перемещению вправо (по рис. 1, а) нажимного диска 7 и дополнительной осадке пружин 10 и 11.

Каждое новое промежуточное равновесное состояние нажимного диска, описываемое соответствующим уравнением, будет характеризоваться текущим значением силы  $F'_{n2} > F_{n2}$ . Поэтому при значении коэффициента трения  $f = f_{\max}$  значение вращающего момента АФМ будет больше, чем вращающий момент  $T_2$ , вычисляемый по формуле (3) при указанном значении коэффициента трения.

Кроме того, увеличение КУ, согласно формуле (6), приведет к уменьшению вращающего момента  $T$  при значении  $f = f_{\min}$ .

В математической форме, изложенное выше, можно описать следующим образом. Распорная сила УУ в данный период работы АФМ вычисляется по следующей формуле:

$$F_p = \frac{T_2}{r} \operatorname{tg} \alpha = z_2 R_{cp} f \frac{F_p - F_{n1} - F_{n2}}{r} \operatorname{tg} \alpha,$$

откуда получаем:

$$F_p = z_2 C f \frac{F_{n1} + F_{n2}}{z_2 C f - 1}.$$

В рассматриваемый период времени выполняется неравенство  $F_p > F_{n1} + F_{n2}$ , поэтому усилие замыкания пар трения ДФГ равно  $F_p$ . На основании этого находим:

$$T_2' = z_2 F_p R_{cp} f = z_2^2 R_{cp} C f^2 \frac{F_{n1} + F_{n2}}{z_2 C f - 1}. \quad (12)$$

Сопоставление вращающих моментов  $T_2$  (по формуле (3)) и  $T_2'$  при значении коэффициента трения  $f_{max}$  показывает, что  $T_2' > T_2$ .

Таким образом, при условии  $C > C_k$  тонность срабатывания АФМ будет снижена.

В том случае, если  $C < C_k$ , то при значении коэффициента трения  $f = f_{max}$  функция (5) не обращается в нуль, и значение максимального вращающего момента АФМ будет определяться по формуле (6), а значение коэффициента точности – по формуле

$$K_T = \frac{f_{max} (1 + z_1 C^* f_{min})}{f_{min} (1 + z_1 C^* f_{max})}. \quad (13)$$

В формуле (13) параметр  $C^*$  – КУ обратной связи, удовлетворяющий условию  $C^* < C_k$ .

Формула (13) идентична по структуре формуле для определения значения коэффициента точности АФМ первого поколения [8, 9].

Для сопоставления точности срабатывания АФМ при различных значениях КУ (критическом значении, меньше и больше критического) воспользуемся графическим способом. Для этого запишем формулу по определению значения коэффициента точности  $K_T$  при условии  $C > C_k$ , воспользовавшись соотношениями (6) (при значении коэффициента трения  $f = f_{min}$ ) и (11) (при значении коэффициента трения  $f = f_{max}$ ):

$$K_T = \frac{z_2^2 C f_{max}^2 (n+1)(1 + z_1 C f_{min})}{f_{min} (z_2 C f_{max} - 1)(z_1 n + z_1 + z_2)}. \quad (14)$$

Комбинированный график, построенный по формулам (11), (13) и (14), показан на рис. 2. При построении кривой 1 в соответствии с изложенными выше рекомендациями приняты следующие исходные данные:  $z_1=6$ ,  $n=8$ ,  $f_{min}=0,1$ ,  $f_{max}=0,8$ ,  $m=8$ ,  $z_2=1$ . Кривая 2 построена при значении  $n=12$  с целью выявления влияния коэффициента  $n$  на точность срабатывания АФМ.

Анализ графиков показывает следующее:

- кривая точности срабатывания АФМ имеет точку минимума, соответствующую значению КУ  $C = C_k$ . В области значений  $C < C_k$  увеличение КУ приводит к повышению точности срабатывания АФМ. В области значений КУ  $C > C_k$  точность срабатывания АФМ резко снижается и становится меньше, чем точность срабатывания неадаптивной предохранительной фрикционной муфты;

- увеличение коэффициента  $n$  приводит к повышению точности срабатывания АФМ при значении КУ  $C = C_k$ . При значениях КУ  $C < C_k$  и  $C > C_k$  изменение значе-

ния коэффициента  $n$  не приводит к изменению точности срабатывания муфты.

В базовом варианте АФМ второго поколения максимальное значение КУ ограничено значением  $C = 1/f_{\max}$  по критерию достижения максимальной точности срабатывания при  $z_2 = 1$  [10, 11]. При принятом выше значении коэффициента трения  $f_{\max}$ , параметрах  $z_1$ ,  $z_2$  и  $f_{\min}$  значение коэффициента точности муфты равно 1,89, т. е. значительно (в 1,67 раза) больше, чем значение коэффициента точности исследуемой АФМ.

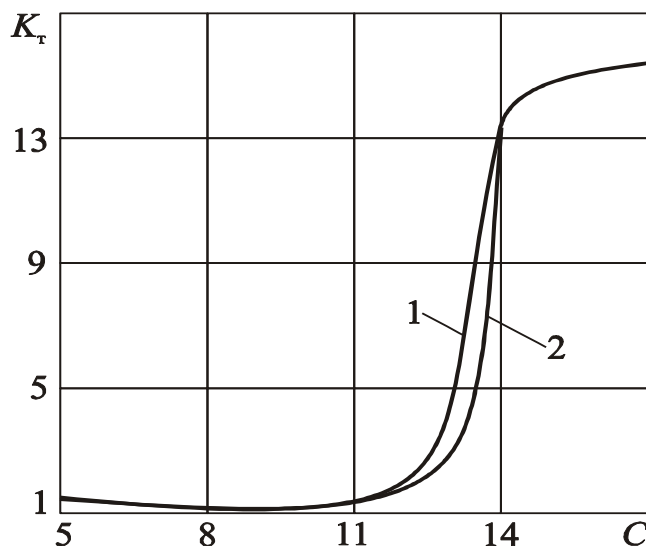


Рисунок 2. Зависимости коэффициента точности от коэффициента усиления УУ

ээффициента  $n$  это означает виртуальное уменьшение КУ относительно значения, определяемого по формуле (8) [12]. Поскольку при  $C < C_k$  точность срабатывания АФМ не зависит от значения коэффициента  $n$  (см. формулу (13)), при его увеличении виртуальное уменьшение значения КУ приведет к снижению точности срабатывания муфты.

Если в результате настройки муфты произойдет уменьшение значения коэффициента  $n$ , то значение КУ, удовлетворяющее условию обращения в ноль функции (5), также становится меньше. Следовательно, в данном случае будет справедливо неравенство  $C > C_k$ , что, согласно рис. 2, приведет к резкому снижению точности срабатывания АФМ.

Таким образом, оптимальным представляется способ настройки АФМ, при котором в результате изменения значений сил натяжения пружин соотношение между этими силами остается неизменным. Постоянство значения коэффициента  $n$  обеспечивается за счет назначения соответствующих значений коэффициентов осевой жесткости пружин, для определения которых запишем следующее равенство:

$$n = \frac{F_{n1}}{F_{n2}} = \frac{F_{n1} + \Delta F_{n1}}{F_{n2} + \Delta F_{n2}}, \tag{15}$$

где  $\Delta F_{n1}$ ,  $\Delta F_{n2}$  – прирост соответственно сил натяжения пружин 10 и 11.

Из равенства (15) находим:

$$n = \frac{F_{n1}}{F_{n2}} = \frac{\Delta F_{n1}}{\Delta F_{n2}}. \tag{16}$$

Задача выбора значений коэффициентов осевой жесткости пружин заключается

Влияние значения КУ на точность срабатывания АФМ, показанное на графике (рис. 2), позволяет найти оптимальный способ настройки муфты. При настройке муфты на заданное значение номинального вращающего момента происходит одновременное изменение сил натяжения пружин  $F_{n1}$  и  $F_{n2}$ . При этом, в зависимости от величин коэффициентов осевой жесткости пружин, может изменяться или оставаться постоянным значение коэффициента  $n$ .

В процессе настройки муфты значение КУ остается постоянным, поэтому при увеличении ко-



в том, чтобы значение, равное отношению прироста сил пружин 10 и 11, оставалось постоянным и равным значению коэффициента  $n$ . Прирост сил натяжения пружин 10 и 11 соответственно равен:

$$\begin{aligned}\Delta F_{n1} &= c_1 x, \\ \Delta F_{n2} &= c_2 x,\end{aligned}\tag{17}$$

при одинаковом значении осадки пружин под действием одного и того же регулировочного элемента. В формулах (17)  $c_1$  и  $c_2$  – коэффициенты осевой жесткости соответственно пружин 10 и 11,  $x$  – осевая осадка пружин.

Подставляя формулы (17) в равенство (16), получаем:

$$n = \frac{c_1}{c_2}.\tag{18}$$

Поскольку значение коэффициента осевой жесткости пружины постоянное, заданное значение коэффициента  $n$  может быть получено путем назначения значений параметров  $c_1$  и  $c_2$  в соответствии с формулой (18).

При уменьшении значения осадки пружин в результате регулирования АФМ соотношения (16) и (18) остаются справедливыми.

Компоновочная схема АФМ обеспечивает соотношение (18) (при  $n > 1$ ): пружина 10 имеет меньший, по сравнению с пружиной 11, средний радиус витков.

Результаты исследования могут быть использованы при расчете и проектировании АФМ с отдельным силовым замыканием пар трения ОФГ и ДФГ.

### Заключение

Таким образом, выполненные исследования позволили реализовать следующее:

1. Повысить значение КУ, при котором обеспечивается адаптивный режим работы муфты в интервале возможных значений коэффициента трения за счет отдельного силового замыкания пар трения фрикционных групп в АФМ, и повысить точность срабатывания муфты.

2. Установить, что наибольшая точность срабатывания АФМ достигается в том случае, когда значение вращающего момента, передаваемого ОФГ, обращается в ноль при максимальном значении коэффициента трения. Этому условию соответствует определенное значение КУ, которое зависит от соотношения исходных сил замыкания фрикционных групп.

3. Доказать, что на точность срабатывания муфты влияет число пар трения ДФГ. Наибольшая точность срабатывания АФМ достигается при числе пар трения ДФГ, равном единице.

4. Показать, что для сохранения достигаемой точности срабатывания АФМ при ее настройке на необходимый вращающий момент отношение значений коэффициентов осевой жесткости замыкающих пружин должно равняться отношению их сил натяжения.

5. Установить, что увеличение отношения значений сил натяжения замыкающих пружин ОФГ и ДФГ приводит к увеличению КУ и точности срабатывания АФМ.

### ЛИТЕРАТУРА:

1. Шишкарев, М. П. Выбор формы нагрузочной характеристики первого конструктивного варианта адаптивной фрикционной муфты с отдельным силовым замыканием / М. П. Шишкарев, А. А. Луцки // Материалы междунар. науч.-практ. конф. «Состояние и

перспективы развития сельскохозяйственного машиностроения» 25-28 февраля 2014 г. – Ростов н/Дону, 2014. – С. 206-209.

2. Шишкарёв, М. П. Оптимизация компоновочного решения базового варианта адаптивной фрикционной муфты второго поколения / М.П. Шишкарёв // Вестн. машиностроения. – 2006. – № 6. – С. 7-10.

3. Шишкарёв, М. П. Влияние точности срабатывания адаптивных фрикционных муфт на массу привода машины / М.П. Шишкарёв // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2008. – № 3. – С. 6-12.

4. Шишкарёв, М. П. Уровень перегрузки при срабатывании адаптивных фрикционных муфт / М.П. Шишкарёв // Вестн. машиностроения. – 2006. – № 2. – С. 13-15.

5. А. с. 1055915 СССР, МПК<sup>3</sup> F 16 D 7/02, F 16 D 13/04. Предохранительная фрикционная муфта / М.П. Шишкарёв (СССР). – № 3475963/25–27; заявл. 28.07.82; опубл. 23.11.83. Бюл. № 43. – 6 с.: ил.

6. Шишкарёв, М. П. Анализ переходного периода адаптивных фрикционных контактов в условиях положительного прироста коэффициента трения / М.П. Шишкарёв // Изв. вузов. Машиностроение. – 2000. – № 3. – С. 14-17.

7. Шишкарёв, М. П. Функциональные связи между характеристиками предохранительных фрикционных муфт / М.П. Шишкарёв // Вестник машиностроения. – 2006. – № 5. – С. 8-10.

8. Шишкарёв, М. П. Точность срабатывания адаптивных фрикционных муфт 1-го поколения с дифференцированными парами трения (ч. 2) // Известия ОрелГТУ. – 2008. – № 3-2/271 (546). – С. 67-71.

9. Фокин, А. Е. Исследование адаптивной фрикционной муфты с дифференцированными парами трения / А. Е. Фокин, М. Д. Гавриленко, М. П. Шишкарёв // Вестник ДГТУ. – 2011. – Т. 11. – № 1 (52). – С. 49-56.

10. Шишкарёв, М. П. Модернизация адаптивной фрикционной муфты второго поколения / М.П. Шишкарёв, Чан Ван Дык // Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2014. – № 10. – С. 40-46.

11. Шишкарёв, М. П. Анализ способов настройки предохранительных фрикционных муфт / М.П. Шишкарёв // Вестник машиностроения. – 2009. – № 8. – С. 29–32.

12. Шишкарёв, М. П. Анализ точности срабатывания адаптивной фрикционной муфты второго поколения / М. П. Шишкарёв, Чан Ван Дык // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2016. – № 5. – С. 33-38.

Поступила в редколлегию 22.03.2021 г.

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>Горобец И. А., Голубов Н. В.</b> УПРАВЛЕНИЕ МАКРОГЕОМЕТРИЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ШЛИФОВАНИИ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ПРИРОДНОГО КАМНЯ.....	3
<b>Григорьева Н. С., Шабайкович В. А.</b> ЛОГИСТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА ПРОДУКЦИИ МАШИНОСТРОЕНИЯ.....	11
<b>Калиниченко О. И., Каракозов А. А., Хохуля А. В.</b> ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СХЕМЫ И ТЕХНИКИ МНОГОРЕЙСОВОГО БУРЕНИЯ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ СКВАЖИН НА МОРСКИХ АКВАТОРИЯХ.....	19
<b>Кузнецова О. А.</b> МОДЕЛИ ОПТИМИЗАЦИОННОГО РАСЧЕТА МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ И СИНТЕЗА ЗАКОНА УПРАВЛЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ. ДВУХМАССОВАЯ МЕХАНИЧЕСКАЯ СИСТЕМА.....	28
<b>Михайлов А. Н., Котляров В. Б., Котляров Б. С., Котляров С. Б.</b> ОБЕСПЕЧЕНИЕ СВОЙСТВ И СТРУКТУРЫ МАТЕРИАЛА ДЕТАЛИ С ПОМОЩЬЮ ФУНКЦИОНАЛЬНО-ОРИЕНТИРОВАННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ.....	38
<b>Михайлов Д.А., Михайлов А.Н., Колодяжный А.А., Шейко Е.А.</b> НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНО- ОРИЕНТИРОВАННЫХ СВОЙСТВ СТРУКТУРЫ ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ И СВЯЗЕЙ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ.....	50
<b>Овчинников Е.В.</b> ИССЛЕДОВАНИЕ ВЯЗКОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК НАНОЖИДКОСТЕЙ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ КОНЦЕНТРАЦИИ ГИБРИДНОГО МАТЕРИАЛА .....	65
<b>Пантелеенко Ф.И., Оковитый В.А., Девойно О.Г., Володько А.С., Сидоров В.А., Оковитый В.В., Асташинский В.М.</b> СОВРЕМЕННОЕ ПРИМЕНЕНИЕ МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ СИСТЕМ МЕТАЛЛ-ХРОМ-АЛЮМИНИЙ-ИТТРИЙ (М- КРОЛЕЙ).....	72
<b>Самуль А.Г., Гилета В.П., Насонов А.И.</b> МИКРОГЕОМЕТРИЯ ДЕТАЛЕЙ ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ ПОСЛЕ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ПОВЕРХНОСТНО-ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ .....	82
<b>Сидоров В.А., Ошовская Е.В., Шамрай Ю.А.</b> УРОВНИ И ЗАДАЧИ ВИЗУАЛЬНОГО ОСМОТРА ПРИ ОЦЕНКЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ГИДРОПРИВОДА.....	91

**Шишкарев М.П.**

**ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ СРАБАТЫВАНИЯ АДАПТИВНОЙ  
ФРИКЦИОННОЙ МУФТЫ ВТОРОГО ПОКОЛЕНИЯ (БАЗОВЫЙ ВАРИАНТ).. 100**

## ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ

Асташинский В.М.	72
Володько А.С.	72
Голубов Н.В.	3
Горобец И.А.	3
Григорьева Н. С.	11
Девойно О.Г.	72
Калиниченко О. И.	19
Каракозов А. А.	19
Колодяжный А.А.	50
Котляров Б.С.	38
Котляров В.Б.	38
Котляров С.Б.	38
Кузнецова О.А.	28
Михайлов А.Н.	38, 50
Михайлов Д.А.	50
Овчинников Е.В.	65
Оковитый В.А.	72
Оковитый В.В.	72
Ошовская Е.В.	91
Пантелеенко Ф. И.	72
Сидоров В.А.	91
Сидоров В.А.	72
Хохуля А. В.	19
Шабайкович В. А.	11
Шамрай Ю.А.	91
Шейко Е.А.	50
Шишкарев М.П.	100

**ПРАВИЛА**  
**представления материалов в международный сборник научных трудов**  
**Донецкого национального технического университета**  
**«ПРОГРЕССИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ МАШИНОСТРОЕНИЯ»**

Международный сборник научных трудов Донецкого национального технического университета «Прогрессивные технологии и системы машиностроения» издается с 1994 года. В этом сборнике публикуются ученые и специалисты более чем из 30 стран мира.

Сборник научных трудов является специальным изданием, научно-технические статьи которого проходят **обязательное рецензирование**. Данный сборник включен в следующие программы:

1. В сборнике могут публиковаться научно-технические статьи и результаты диссертационных работ.
2. Сборник включен в **перечень ВАК ДНР** (приказ № 774 от 24.07.2017 г.).
3. Сборник имеет сайт <http://ptsm.donntu.org>, а также размещен на сайте кафедры «Технология машиностроения» ДонНТУ, г. Донецк: <http://tm.donntu.org>
4. Сборник включен **базу данных РИНЦ (Российский индекс научного цитирования) (лицензионный договор № 177-04/2013 от 12.04. 2013 г.)** и размещен на сайте НЭБ (Научная электронная библиотека, г. Москва, Россия, <http://elibrary.ru>)
5. Данный сборник имеет **международную индексацию ISSN 2073-3216 (печатная версия) и ISSN 2518-7120 (сетевое издание)**

Статьи представляемые в данный сборник должны отвечать следующим требованиям.

Содержание статей должно отражать новые достижения науки и техники в области машиностроения, их практическое значение, соответствовать технической направленности сборника и представлять интерес для широкого круга специалистов.

В статье должно быть кратко изложено то новое и оригинальное, что разработано авторами, показано преимущество перед аналогами предлагаемых разработок, описаны их особенности и практическая значимость. Результаты работы не должны представляться в виде тезисов.

Ответственность за нарушение авторских прав, за несоблюдение действующих стандартов и за недостоверность в статье данных полностью несут авторы статьи.

Присланные в редакционную коллегию статьи подвергаются обязательному рецензированию. Редакционная коллегия оставляет за собой право вносить в текст статьи изменения редакционного характера без согласования с авторами, а также не публиковать статьи, которые не отвечают нашим требованиям.

Языки представления рукописей: **русский, украинский и английский.**

**ОСНОВНАЯ ТЕМАТИКА СБОРНИКА**

Тематика представляемых статей должна основываться на проблемах машиностроения (механики) и представляться в рамках следующих направлений:

1. Практика и перспективы создания и применения прогрессивных и нетрадиционных технологий машиностроения. Интегрированные технологии. Сборка в машино- и приборостроении. Абразивные и виброабразивные технологии. Гибридные и комбинированные технологии машиностроения.

2. Механизация и автоматизация производственных процессов машиностроения. Прогрессивное оборудование машиностроительных производств.

3. Комплексная автоматизация проектирования, подготовки и управления машиностроительным производством.

4. Проблемы создания и применения прогрессивных инструментов и инструментальных материалов в машиностроении.

5. Управление качеством продукции и технических систем машиностроения. Проблемы инженерии поверхностного слоя изделий.

6. Современные проблемы машиноведения и деталей машин.

7. Современные проблемы инженерии материалов. Упрочняющие технологии и покрытия изделий машиностроения. Наноматериалы и нанотехнологии в машиностроении.

8. Вопросы моделирования и расчетов сложных технологических систем машиностроения.

В рамках сборника можно представлять рекламу продукции, которая будет помещена после рукописей статей.

### **СОДЕРЖАНИЕ СТАТЕЙ**

Научно-технические статьи, представляемые в данный сборник должны иметь следующие элементы:

- постановка проблемы в общем виде и ее связь с важными научными и практическими заданиями;

- анализ последних достижений и публикаций, в которых начато решение данной проблемы, выделение нерешенных раньше частей общей проблемы, которым посвящается данная статья;

- формулирование цели и постановка задач работы;

- представление основного материала исследования с полным обоснованием полученных научных результатов, формулирование рекомендаций;

- выводы по данному исследованию и перспективы дальнейшего развития данного направления.

### **ПРЕДСТАВЛЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ**

Для принятия решения о включении материалов Вашей статьи в сборник необходимо выслать в адрес редакционной коллегии следующее:

- заявку и сведения об авторах статьи;
- материалы статьи;
- экспертное заключение о возможности публикации статьи в открытой печати;
- все материалы отправляются по E-mail по адресам: [tm@fimm.donntu.org](mailto:tm@fimm.donntu.org) или [mntk21@mail.ru](mailto:mntk21@mail.ru) .

### **ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ**

1. Текст статьи выполняется объемом от 5 до 10 страниц (**обязательно полные страницы**), формат А4 (210x297 мм) с полями: верхнее и нижнее – 30 мм, а левое и правое - 25 мм. Страницы не нумеровать. Статьи оформить с применением редактора WinWord (не ниже версии 6,0) шрифтом Times New Roman, выполненным в соответствии с образцом оформления, межстрочный интервал - 1,0, шрифт – 12pt. Материалы представить в электронном виде.

2. Порядок оформления. Материалы должны отвечать следующей структурной схеме: УДК, инициалы и фамилии авторов, ученая степень и звание (сокращение по ГОСТ 7.11-2003 и 7.12-2003), полное название организаций и стран, тел./факс, E-mail, название статьи, аннотация на языке статьи, ключевые слова, основной текст, заключение



или выводы, список литературы, дополнительные аннотации на других языках с ключевыми словами, внизу первой страницы необходимо указать авторский знак - ©. **УДК** печатать прописными (жирными) буквами в верхнем правом углу не отступая от верхнего поля. На следующей строке слева жирными строчными буквами – **инициалы и фамилии** авторов с учеными степенями и званиями, на следующих строках – полное название организаций и стран (через запятую, слева). На следующей строке курсивом слева – тел./факс и электронный адрес одного из авторов. Через один интервал - название статьи, печатать прописными (жирными) буквами, без переносов, центрировать по ширине, максимумом три строки. Через один интервал - аннотации с ключевыми словами (слово аннотация не пишется) на двух языках шрифтом 10 pt, *курсивом*. Через один интервал – материалы статьи, шрифт 12 pt (язык изложения – по выбору авторов, межстрочный интервал 1,0). Внизу первой страницы статьи необходимо указать авторский знак - ©. Между соответствующими разделами статьи необходимо делать интервал. (См. образец оформления материалов). Абзац текста – 1,25.

3. Графический материал (рисунки, графики, схемы) следует выполнять в формате \*.bmp, \*.gif, \*.psx, \*.dwg, \*.jpg - размерами не менее 60x60 мм внедренными объектами (по ходу материалов). Все позиции, обозначенные на рисунке, должны быть объяснены в тексте. Позиции на рисунке должны располагаться по часовой стрелке. Под каждым рисунком указывается его номер и название, например: Рисунок 3. Схема устройства. Текст названия рисунка группируется с рисунком. Каждый рисунок должен иметь один интервал сверху и снизу.

4. Формулы и математические знаки должны быть понятны. Показатели, степени и индексы должны быть меньше основных знаков и выполняться в соответствии с редактором формул Microsoft Equation. Формулы номеруются (справа в круглых скобках, не отступая от правого поля), только в том случае, если на них в тексте имеются ссылки. Между крайними знаками формулы и текстом должен выполняться один интервал. Формулы выполняются курсивом.

**Стиль формул для Microsoft Equation:** Full - 12 pt, Subscript/Superscript - 10 pt, Sub-Subscript/Superscript - 8 pt, Symbol - 12 pt, Sub-Symbol - 10 pt.

5. Все таблицы должны иметь название и порядковый номер и располагаться после упоминания по тексту, например: Таблица 2. Классификация муфт. Каждая таблица должна иметь один интервал сверху и снизу.

6. **Список литературы** должен быть приведен в конце статьи в соответствии с ГОСТ 7.1-2003 . Перечень ссылок должен быть составлен в порядке упоминания в тексте. Ссылки на литературу заключаются в квадратные скобки. Количество библиографических источников должно быть не менее 5, в том числе 3 источника должно быть за последние 5 лет.

7. Файл со статьей необходимо назвать по фамилиям и инициалам авторов в соответствии с работой (например: Иванов И.И., Петренко П.П.)

8. Материалы статьи представляются в электронном виде.

9. Материалы, не отвечающие перечисленным требованиям и тематике данного сборника, а также поступившие в редакционную коллегию с опозданием, **опубликованы не будут**.

### **СТАТЬИ ДОЛЖНЫ ИМЕТЬ СЛЕДУЮЩУЮ СТРУКТУРУ:**

**1. УДК** (Например, **УДК 621.01**) (располагать вверху справа, шрифт жирный, 12 pt).

**2. Инициалы и фамилии авторов** (слева, шрифт жирный, 12 pt), ученая степень и звание, затем на следующей строке - полное название *организаций и стран* (слева, 12 pt), на следующей строке – *Тел./факс и электронный адрес* (слева, курсив, 12 pt).

**3. Название статьи** (слева, шрифт жирный, 12 pt, максимум три строки).

**4. Пустые строки, межстрочный интервал и размеры шрифта статьи.** Пустые строки выполняются между названием статьи - вверху и внизу, перед соответствующими разделами работы (один пробел) и списком литературы, а также между дополнительной аннотацией вверху и внизу. Межстрочный интервал – **1,0**. Размер шрифта статьи - **12 pt**, размер шрифта аннотаций и авторского знака - **10 pt**.

**5. Аннотации (Abstract)** (слово аннотация не пишется), (курсив, 10 pt). Первая аннотация пишется на языке статьи, а вторая на английском, если статья на английском языке, первая аннотация пишется на английском языке, а вторая – на русском языке.

В аннотации приводятся краткие сведения о всей статье в целом на языке статьи. Объем аннотаций приблизительно до 10 строк, аннотация выполняется курсивом.

**6. Ключевые слова (Keywords)** (приводится 5-6 ключевых слов статьи), выполняются курсивом на следующей строке от аннотации. (курсив, 10 pt)

**7. Введение (Introduction).** (12 pt)

Во введении приводится аналитический (исторический) обзор современного состояния вопроса исследования, выполняется постановка проблемы исследования или показывается актуальность данного исследования (работы). Здесь нужно обязательно указать результаты последних исследований других авторов. А также сформулировать цель и задачи исследований.

**8. Основное содержание и результаты работы (The main contents and outcomes of activity).** (Авторы могут дополнять работу другими разделами) (12 pt).

В данном разделе излагаются и подробно разъясняются полученные авторами теоретические положения и практические результаты. Приводятся принятые гипотезы и используемые допущения, разъясняются малоизвестные термины, аббревиатуры и условные обозначения. Для теоретических положений приводятся их доказательства и необходимые математические преобразования. Для экспериментальных исследований кратко описываются методики их проведения, способы обработки данных и результаты проверок адекватности и достоверности результатов.

**9. Авторский знак.** Внизу первой страницы статьи необходимо указать авторский знак - ©. Например: © Иванов И.И., Петренко П.П.; 2021 (10 pt).

**10. Заключение (Conclusion)** (12 pt)

В заключении излагаются выводы по полученным авторами результатам, описываются примеры их практического применения, предлагаются рекомендации относительно их использования, приводятся выводы, а также указываются перспективы дальнейших исследований по данной проблематике.

**11. Литература (References).** (12 pt)

Список литературных источников должен быть составлен в порядке ссылок на них. Ссылки на литературу в тексте статьи заключаются в квадратные скобки. Количество библиографических источников должно быть не менее 5-6, в том числе 3 источника должно быть за последние 5 лет.

## АДРЕС РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ:

ДНР, 283001, г. Донецк, ул. Артема, 58, ДонНТУ, кафедра «Технология машиностроения», Редакционная коллегия сборника.

Тел./факс: +38 062 301-08-40.

E-mail: [tm@fimm.donntu.org](mailto:tm@fimm.donntu.org) или [mntk21@mail.ru](mailto:mntk21@mail.ru)

<http://ptsm.donntu.ru>

- **Публикация статей в международном сборнике научных трудов «Прогрессивные технологии и системы машиностроения» - выполняется бесплатно**

*Образец оформления материалов*  
УДК 621.85.05-034(12 pt)

**И. И. Иванов**, д-р техн. наук, проф., **П. П. Петренко**, ассист. (12 pt)  
Донецкий национальный технический университет, ДНР (12 pt)  
Брянский государственный технический университет, Россия (12 pt)  
Тел./Факс: +38 (062) 3050104; E-mail: [tm@fimm.donntu.org](mailto:tm@fimm.donntu.org) (курсив, 12 pt)

(пустая строка - 12 pt)

**ОСНОВЫ СТРУКТУРНОГО СИНТЕЗА СБОРОЧНЫХ СИСТЕМ**  
(слева, 12 PT, ЖИРНЫМ, ЗАГЛАВИЕ МАКСИМУМ ТРИ СТРОКИ)

(пустая строка - 12 pt)

*В статье приведены данные по структурному синтезу сборочных .....  
..... уравнений описывающих процесс сборки изделий. (курсив, 10 pt, до 10 строк).*

*Ключевые слова: структура технологии, синтез, процесс, технология, сборка. (курсив, 10 pt, 5 ...6 слов)*

(пустая строка - 10 pt)

**I. I. Ivanov, P. P. Petrenko** (10 pt)  
(10 pt)

**BASES OF THE STRUCTURED SYNTHESSES OF THE ASSEMBLY SYSTEMS** (10 pt)

*The efficient design of assembly machinery is vitally important .....  
.....as noun description of functions of presented in the paper.*

*Keywords: structured syntheses, process of the assembly, technological system. (курсив, 10 pt)*

(пустая строка - 12 pt)

### **1. Введение** (12 pt)

Сборочные системы являются сложными иерархическими системами. Одним из условий [1] повышения производительности ... сборочных технологических систем (рис. 5). Технологические системы .....

(пустая строка - 12 pt)

### **2. Основное содержание и результаты работы** (12 pt)

Для сборки изделий широко применяются технологические системы .....  
информационные и другие потоки могут быть описаны следующим образом:

$$k_m = \sqrt{a^2 + b^2}, \quad (1)$$

где  $k_m$  - элемент множества;

..... позволили разработать общие алгоритмы функционирования системы.

(пустая строка - 12 pt)

### **3. Общий алгоритм и рекомендации (12 pt)**

Выполненные исследования позволили разработать общий алгоритм .....

..... основывается на итерационном подходе.

(пустая строка - 12 pt)

### **4. Цифровые модели (12 pt)**

В работе разработаны цифровые структурно-логические модели структуры сборочных систем, выполненные с применением основных положений алгебры структур .....

(пустая строка - 12 pt)

### **5. Заключение (12 pt)**

Таким образом, выполненные исследования позволили реализовать следующее:

1. Разработать методику синтеза структурных вариантов .....

..... отличительной особенностью данной методики.

2. Установить закономерности .....

..... позволили произвести процесс итерации.

3. Разработать рекомендации .....

© Иванов И.И., Петренко П.П.; 2016 (приводится внизу первой страницы статьи, 10 pt)

..... внедрить на производстве.

(пустая строка - 12 pt)

### **ЛИТЕРАТУРА:**

(центрировать, 12 pt, не менее 5 ... 6 библиографических источников)

1. Ким, И. П. Исследование эффективности роторных машин / И. П. Ким. – К: КПИ, 1985. – 123 с. ISBN 966-7907-22-8.

2. Устюгов, А. В. Надежность технологических машин / А. В. Устюгов. – Донецк: ДонНТУ, 1998. – 425 с. ISBN 966-7907-23-6.

3. Савельев, А. А. Сборка машин / А. А. Савельев – М.: Наука, 2009. - 342 с. ISBN 966-7907-26-9.

4. Михайлов, А. Н. Основы синтеза функционально-ориентированных технологий / А. Н. Михайлов – Донецк: ДонНТУ, 2009. – 346 с. ISBN 966-7907-24-4.

5. Базров, Б. М. Модульные технологии / Б. М. Базров. – М.: Машиностроение, 2000. – 368 с. ISBN 5-217-03061-5.

6. Сидоров, И. А. Учет переменности параметров процесса точения фасонных поверхностей при определении оптимальных режимов резания / И.А. Сидоров, А.Н. Алехин // Научно-технический журнал. – М: Машиностроение. – 2014. - № 9. – С. 11-17.

7. Любшин, А. Н. Особенности полировки лопаток с коррозионными разрушениями покрытий / А. Н. Любшин, А. Н. Шейко, Б. Л. Недашковский // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научных работ. – Донецк: ДонНТУ, 2013. – Вып. 1 (25). – С. 207-212

(пустая строка - 12 pt)

Поступила в редколлегию \_\_\_\_\_ (дата поступления статьи, 10 pt)

**НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ**

**ПРОГРЕССИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И  
СИСТЕМЫ МАШИНОСТРОЕНИЯ**

**Выпуск 3 (74)' 2021**

Главный редактор  
*д-р техн. наук, проф. А.Н. Михайлов*  
E-mail: [tm@fimm.donntu.org](mailto:tm@fimm.donntu.org)  
*Технический редактор Л. Б. Ступакова*

*Учредитель и издатель – ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ*

Адрес издателя: ДНР, 83001, г. Донецк, ул. Артема, 58, ГОУВПО «ДОННТУ»,  
+38 (062) 337-17-33, 335-75-62

Адрес редакции: ДНР, 83001, г. Донецк, ул. Артема, 58, тел. +38 (071) 306-08-79,  
+38 (062) 301-08-05.

E-mail: [tm@fimm.donntu.org](mailto:tm@fimm.donntu.org)

Сайт: <http://ptsm.donntu.org>

Сборник (Е) зарегистрирован в Министерстве информации Донецкой Народной Республики.