

MIESIĘCZNIK  
POŁOCKI.

Т о м I.  
Р о к 1818.

*«Вестник Полоцкого государственного университета»  
продолжает традиции первого в Беларуси литературно-  
научного журнала «Месячник Полоцкий».*



---

---

ВЕСНИК ПОЛАЦКАГА ДЗЯРЖАУНАГА УНІВЕРСІТЭТА  
Серыя В. Прамысловасць. Прыкладныя навукі

У серыі В навукова-тэарэтычнага часопіса друкуюцца артыкулы, якія прайшлі рэцэнзаваанне, змяшчаюць новыя навуковыя вынікі ў галіне машынабудавання і машыназнаўства, матэрыялазнаўства і металургіі, хімічных тэхналогій.

---

---

ВЕСТНИК ПОЛОЦКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА  
Серия В. Промышленность. Прикладные науки

В серии В научно-теоретического журнала публикуются статьи, прошедшие рецензирование, содержащие новые научные результаты в области машиностроения и машиноведения, материаловедения и металлургии, химических технологий.

---

---

HERALD OF POLOTSK STATE UNIVERSITY  
Series B. Industry. Applied sciences

Series B includes reviewed articles which contain novelty in research and its results in mechanical engineering and machine science, material authority and metallurgy, applied chemistry.

---

Журнал входит в Российский индекс научного цитирования.

Адрес редакции:

Полоцкий государственный университет, ул. Блохина, 29, г. Новополоцк, 211440, Беларусь  
тел. + 375 (214) 53 34 58, e-mail: vestnik@psu.by

Отв. за выпуск В.П. Иванов, Н.Н. Попок, А.А. Ермак.  
Редактор Р.Н. Авласенок.

Подписано к печати 27.02.2019. Бумага офсетная 70 г/м<sup>2</sup>. Формат 60×84<sup>1</sup>/<sub>8</sub>. Ризография.  
Усл. печ. л. 16,27. Уч.-изд. л. 19,62. Тираж 100 экз. Заказ 846.

## МАШИНОВЕДЕНИЕ И МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 621.9.06-529+372.8:62

### ФУНКЦИОНАЛЬНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ В ПОЗНАНИИ СТАНОЧНОГО ОБОРУДОВАНИЯ С ЧИСЛОВЫМ ПРОГРАММНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

*канд. техн. наук, проф. А.И. ГОЛЕМБИЕВСКИЙ  
(Полоцкий государственный университет)*

*Рассматривается использование функционального проектирования кинематической структуры станочного оборудования с числовым программным управлением, содержащего сложные мехатронные формообразующие группы. Анализируется функционирование оборудования по закону, задаваемому соответствующим виртуальным техническим решением – способом формообразующей обработки. Показан итерационный характер функционального проектирования. Предлагается методика настройки мехатронных формообразующих групп на траекторию сложного формообразующего движения и его скорость. Решается задача устранения отрицательного влияния девиации механики исполнительных органов на качество обрабатываемой поверхности.*

**Ключевые слова:** станочное оборудование с числовым программным управлением; функциональное проектирование; настройка мехатронных формообразующих групп; параметры настройки; девиация механики исполнительных органов; устранение девиации.

**Введение.** Современная парадигма познания кинематической структуры станочного оборудования в высшей школе [1] базируется на фундаментальных положениях теоретической механики: законе разветвления механической энергии в кинематических цепях и принципе возможных перемещений, известном в кинематике как принцип Даламбера. Эта парадигма включает логически связанные части: основы теории формообразования реальных поверхностей в машиностроении, понятие о способе формообразующей обработки и понятие о кинематической структуре, функции и настройке металлорежущих станков [2].

В учебной литературе для вузов по направлению подготовки «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств», основополагающие понятия парадигмы познания представляются как уже известные, технические решения. Такой подход не стимулирует творческое мышление при изучении виртуальных технических решений (способов формообразующей обработки) и соответствующих им реальных технических объектов (кинематической структуры металлорежущих станков), являющихся объектами интеллектуальной собственности и защищаемых патентами на изобретения. Данное явление есть противоречие между современной парадигмой познания и сложившейся методикой ее использования, устраняется посредством включения функционального проектирования в методику изучения станочных дисциплин [3]. В учебном процессе функциональное проектирование – это синтез технического объекта (структурной схемы металлорежущего станка) по закону его функционирования, задаваемому виртуальным техническим решением (способом формообразующей обработки).

Согласно современной научной парадигме определяющую роль при синтезе кинематической структуры станка играют группы формообразования, воспроизводящие образующую и направляющую реальных поверхностей. В зависимости от характеристического образа инструмента и класса воспроизведения образующей и направляющей формообразующие группы делятся на два вида. *Первый вид* составляют простые (элементарные) формообразующие группы. В таких группах траектория вращательного или поступательного формообразующего движения не настраивается, а ее вид задается непосредственно соответствующей элементарной вращательной или поступательной кинематической парой. *Второй вид* – сложные формообразующие группы, воспроизводящие сложное двухэлементарное или трехэлементарное формообразующее движение, имитирующее более сложный механизм, например, передачу винт-гайка, червячную передачу, зубчато-реечную передачу. В таких группах траектория формообразующего движения настраивается соответствующим механизмом с точностью до 5...7 знаков после запятой.

**Постановка задачи.** Современная научная парадигма и функциональное проектирование разрабатывались на основе кинематического анализа станочного оборудования с механическими связями. Создание мехатронных технических систем, в том числе металлорежущих станков с числовым программным управлением (ЧПУ), привело к созданию сложных гибридных формообразующих групп, структура кото-

рых представляет собой объединение механических и электронных связей на основе типовых интегральных схем. В данном случае представляется целесообразным с позиций современной парадигмы рассмотреть функциональное проектирование в методике познания станочного оборудования с ЧПУ.

Анализ патентных источников показывает, что в сложных гибридных формообразующих группах, воспроизводящих станочное зацепление, имитирующее конкретную передачу, функциональная связь исполнительных органов группы осуществляется, как правило, отслеживающей синхронизацией по схеме «задающая – ведомая координаты» и по схеме «равнозначных координат».

**Основная часть.** Процесс функционального проектирования носит итерационный характер, то есть от этапа к этапу, начиная с анализа соответствующего способа формообразующей обработки, последовательно приближает к решению поставленной задачи.

На первом этапе анализируем способ формообразующей обработки, подлежащий реализации в кинематической структуре разрабатываемого станка.

На рисунке 1 приведена схема классического способа нарезания резьбы резцом, у которого характеристический образ соответствует профилю нарезаемой

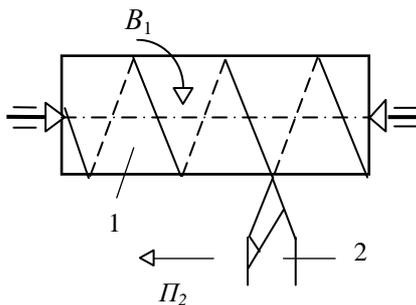


Рисунок 1. – Способ нарезания резьбы

занных элементарных вращательного и поступательного движений.

На втором этапе выполним графическое оформление (рисунок 2) подвижных исполнительных органов (подвижных блоков) структурной схемы станка.

Исполнительный орган, несущий заготовку 1, представляет собой шпиндель 3, смонтированный с возможностью вращения  $B_1$  в стационарном блоке 4, называемом передней бабкой. Исполнительный орган, несущий резец 2 – это подвижный блок 5, называемый продольным суппортом (или кареткой), смонтированным с возможностью поступательного перемещения  $\Pi_2$  по направляющим 6 параллельно линии центров станка. Поступательное перемещение суппорта обеспечивается посредством тягового вала (ТВ). В токарно-винторезных станках с ЧПУ в качестве тягового вала используется передача винт-гайка с телами качения.

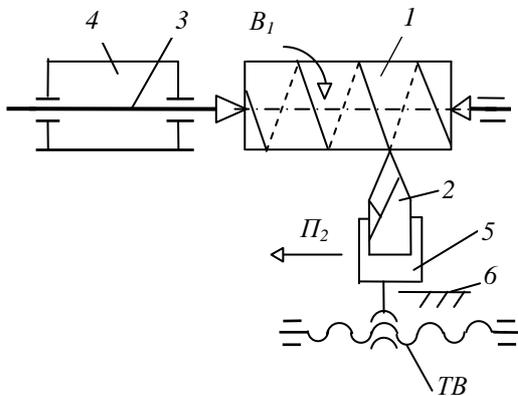


Рисунок 2. – Исполнительные органы структурной схемы станка

резцы. Класс образования поверхности копирование – след ( $E - H^C$ ) [4]. По этой схеме заготовке 1, определенной образом ориентированной в пространстве, сообщают вращательное движение  $B_1$ , а резцу 2 – поступательное движение  $\Pi_2$ , функционально связанное с движением  $B_1$  заготовки. Причем сложное исполнительное движение  $\Phi_v(B_1\Pi_2)$ , состоящее из двух согласованных между собой элементарных движений: вращательного  $B_1$  и поступательного  $\Pi_2$  воспроизводит направляющую (винтовую линию) обрабатываемой поверхности. Следовательно, частная винторезная структура станка должна осуществлять только одно сложное формообразующее движение, состоящее из двух функционально связанных элементарных вращательного и поступательного движений.

На третьем этапе решают вопрос о количестве источников механической энергии, о схеме электронной составляющей сложной гибридной группы, ее связи с механической составляющей группы и выводят формулы настройки на траекторию и скорость сложного двухэлементарного исполнительного движения.

Независимо от схемы электронной составляющей каждый исполнительный орган сложной гибридной формообразующей группы оснащается отдельным источником механической энергии (как правило, регулируемым электродвигателем).

Синтез кинематической структуры станка с системой синхронизации по схеме «задающая – ведомая координаты». Для воспроизведения сложного формообразующего движения  $\Phi_v(B_1\Pi_2)$ , воспроизводящего направляющую – винтовую линию нарезаемой резьбы, соединим шпиндель 3, несущий заготовку, с тяговым валом ТВ суппорта 5, несущего резец 2. Для этого соединим шпиндель 3 (задающая координата) посредством механической передачи 7 с импульсным измерительным преобразователем 8. Выход этого преобразователя соединим с входом управляемого делителя частоты, выполненного в виде счетчика импульсов 9 и блока задания коэффициента деления 10. Выход счетчика 9 делителя частоты соединим с входом импульсно-аналогового преобразователя 11. Выход этого преобразователя соединим через предварительный усилитель 12 и усилитель мощности 13 с электродвигателем  $M_2$ , кинематически связанным

с тяговым валом  $TB$  привода суппорта 5 (ведомая координата). Ведущую координату (шпиндель 3) кинематически соединим с электродвигателем  $M_1$ .

Запишем связи разрабатываемой гибридной структурной схемы на языке символов.

Внутренняя связь – мехатронная цепь, включающая механические передачи и типовые интегральные схемы:

$B_1 \rightarrow 3 \rightarrow 7 \rightarrow$  (синхронная следящая система:  $8 \rightarrow 9 \rightarrow 11 \rightarrow 12 \rightarrow 13$ )  $M_2 \rightarrow TB \rightarrow 5 \rightarrow \Pi_2$ .

Внешняя связь

$M_1 \rightarrow 3 \rightarrow 7$  (звено соединения связей).

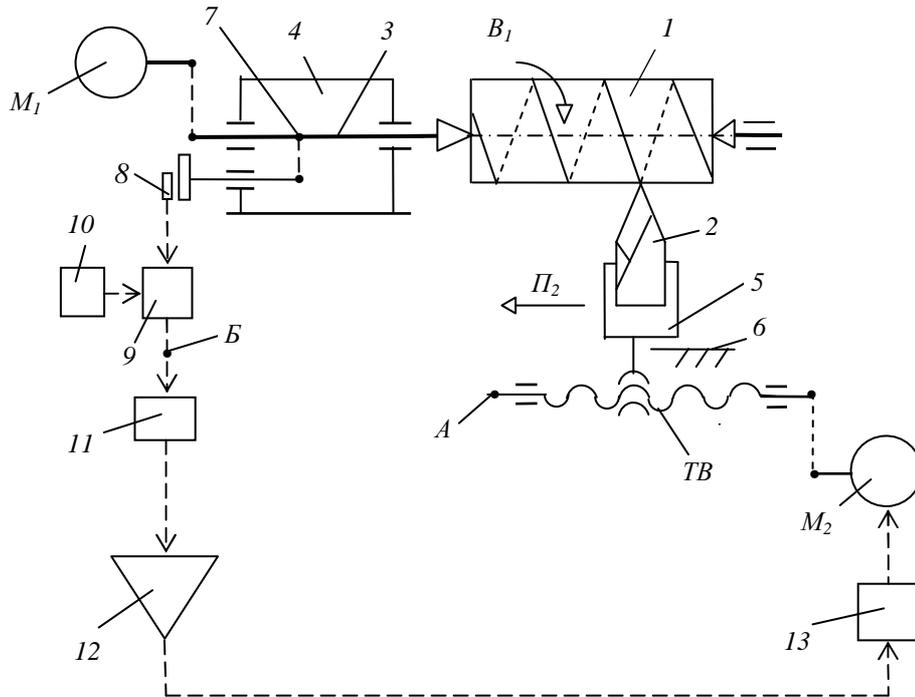


Рисунок 3. – Гибридная структура резбонарезного станка с электронной системой синхронизации по схеме задающая – ведомая координаты

Принципиальной особенностью данной гибридной схемы является размещение электродвигателя  $M_2$  ведомой координаты во внутренней связи формообразующей группы. Поэтому в качестве этого электродвигателя необходимо использовать высокомоментную машину постоянного тока или синхронную машину переменного тока. В качестве электродвигателя  $M_1$  можно использовать менее дорогостоящую асинхронную машину переменного тока.

Движение  $\Phi_1(B_1\Pi_2)$  имеет незамкнутую траекторию и настраивается по всем пяти параметрам: на траекторию – делителем частоты; на скорость – посредством задания величины напряжения при использовании электродвигателя постоянного тока или частоты переменного тока при использовании электродвигателя переменного тока; на направление, исходное положение и путь – программно на программноносителе или непосредственно на дисплее устройства ЧПУ в соответствующем коде.

Делитель частоты (счетчик 9 – блок установки коэффициента деления 10) является аналогом механического органа настройки (например, гитары сменных зубчатых колес). Поэтому коэффициент деления определим по методике определения передаточного отношения механического органа настройки на траекторию. Следовательно, расчетные перемещения (РП) для коэффициента деления  $i_9$  имеют вид:

$$1 \text{ оборот заготовки } (B_1) \rightarrow P \text{ мм перемещения инструмента } (\Pi_2).$$

Тогда уравнение кинематической цепи (УКЦ) представим как

$$P = 1 \cdot i_9 \cdot i_0 \cdot P_{TB},$$

где  $i_9$  – коэффициент деления;  $P$  – шаг нарезаемой резьбы;  $i_0$  – передаточное отношение передачи, связывающей электродвигатель  $M_2$  с тяговым валом;  $P_{TB}$  – шаг тягового вала.

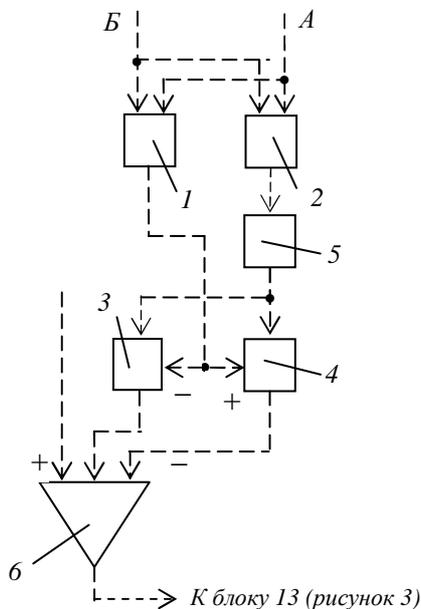
Формула настройки (ФН):

$$i_9 = P / (i_0 P_{TB}).$$

При включении управляемого электродвигателя  $M_1$  ведущая координата (шпиндель 3) получает движение  $V_1$  с круговой частотой, соответствующей скорости резания. Вращательное движение шпинделя непрерывно преобразуется в импульсном измерительном преобразователе 8 в высокочастотный импульсный сигнал, пропорциональный круговой частоте движения  $V_1$ , который поступает в счетчик 9 делителя частоты, где происходит его деление в соответствии с заданным на блоке 10 коэффициентом деления. Импульсный сигнал с выхода делителя частоты преобразуется в импульсно-аналоговом преобразователе 11 в напряжение, пропорциональное частоте входного сигнала, и с его выхода через предварительный усилитель 12 поступает на усилитель мощности 13. С выхода этого усилителя задающий сигнал поступает на управляемый электродвигатель  $M_2$ , который посредством тягового вала  $TB$  сообщает движение  $\Pi_2$  ведомой координате (суппорту 5), несущему резец. В результате такого прохождения сигнала от ведущей координаты к ведомой координате обеспечивается воспроизведение винтовой линии резьбовой поверхности сложным двухэлементарным движением  $\Phi_v(V_1\Pi_2)$ .

Полученная в результате функционального проектирования мехатронная структурная схема используется преимущественно в качестве частной кинематической структуры в универсальных токарно-винторезных станках с ЧПУ.

При функционировании полученной структурной схемы девиация механики ведомой координаты (электродвигатель  $M_2$  – тяговый вал  $TB$  – суппорт 5) проецируется на воспроизводимую винтовую поверхность. Это явление, снижающее качественные показатели резьбы, можно устранить посредством адаптивной двухсторонней коррекции задающего сигнала ведомой координаты. Для этого используем



**Рисунок 4. – Формирователи двухсторонней коррекции задающего сигнала**

блок формирователя сигнала коррекции (рисунок 4). Этот блок [5] содержит знаковый 1 и фазовый 2 дискриминаторы. Выход знакового дискриминатора 1 соединен с управляющим входом ключа 3, управляемого отрицательным потенциалом, и с управляющим входом ключа 4, управляемого положительным потенциалом. Выход фазового дискриминатора 2 соединен через импульсно-аналоговый преобразователь 5 с аналоговыми входами ключей 3 и 4. Выход ключа 3 соединен со вторым входом сложения параллельного сумматора 6, а выход ключа 4 – с входом вычитания этого сумматора. Первые входы обоих дискриминаторов соединены с разъемом Б (см. рисунок 3). Вторые входы дискриминаторов – с импульсным измерительным преобразователем, который устанавливаем на тяговом валу  $TB$  (см. рисунок 3, позиция А).

Из структурной схемы (см. рисунок 3) исключим предварительный усилитель 12, а выход импульсно-аналогового преобразователя 11 соединим с первым входом сложения параллельного сумматора 6 формирователя сигнала коррекции. Выход параллельного сумматора соединим с усилителем мощности 13.

Двухсторонняя коррекция задающего сигнала, действующего на выходе параллельного сумматора 6, осуществляется следующим образом. На первых входах знакового 1 и фазового 2 дискриминаторов постоянно действует задающий импульсный сигнал с выхода счетчика 9 делителя частоты. На вторые входы обоих дискриминаторов непрерывно с импульсно-аналогового преобразователя, установленного на тяговом валу, поступает импульсный сигнал – аналог скорости движения  $\Pi_2$  суппорта 5 (см. рисунок 3, позиция А). В результате сравнения сигналов на выходе знакового дискриминатора 1 образуется отрицательный потенциал при отставании ведомой координаты от заданного значения и положительный потенциал при его опережении, который поступает на управляющие входы ключей 3 и 4. Одновременно на выходе фазового дискриминатора 2 образуется сигнал абсолютной погрешности. Этот сигнал после преобразования в аналоговую форму в импульсно-аналоговом преобразователе 5 поступает на аналоговые входы ключей 3 и 4, затем – на параллельный сумматор 6 через один из ключей в зависимости от знака управляющего воздействия. При отставании ведомой координаты сигнал абсолютной погрешности поступает через ключ 3, управляемый отрицательным потенциалом, на второй вход сложения параллельного сумматора 6, а при опережении этот сигнал поступает через ключ 4, управляемый положительным потенциалом, на вход вычитания этого сумматора. В итоге в параллельном сумматоре 6 происходит в зависимости от знака

погрешности увеличение или уменьшение управляющего сигнала ведомой координаты, то есть происходит его непрерывная, двухсторонняя коррекция относительно номинального значения.

Синтез кинематической структуры станка с системой синхронизации по схеме равнозначных координат рассмотрим на примере фрезерования

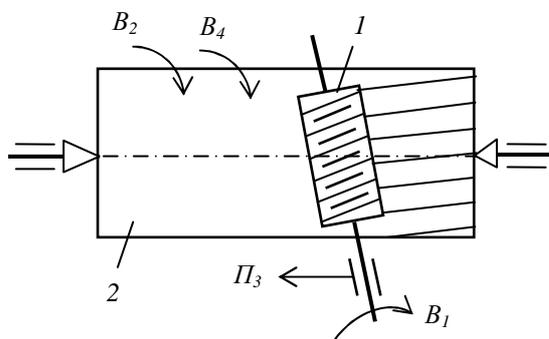


Рисунок 5. – Способ фрезерования червячной фрезой шлицевых валов

образующими два сложных двухэлементарных формообразующих движения: обката  $\Phi_v(B_1B_2)$  и винтовое  $\Phi_s(P_3B_4)$ . При этом на заготовке суммируется два вращательных движения. Следовательно, кинематическая структура станка будет содержать только три исполнительных органа – шпиндель фрезы, суппорт фрезы и шпиндель заготовки. Таким образом, кинематическая структура станка должна содержать две сложные формообразующие пересекающиеся группы  $\Phi_v(B_1B_2)$  и  $\Phi_s(P_3B_4)$ .

При обработке прямых шлицев отпадает необходимость в движении  $B_4$ . В этом случае сложное формообразующее движение  $\Phi_s(P_3B_4)$  преобразуется в простое  $\Phi_s(P_3)$ . Соответственно сложная двухэлементарная группа подачи преобразуется в простую элементарную группу.

На втором этапе осуществим графическое оформление подвижных исполнительных органов и источников энергии (электродвигателей) структурной схемы станка.

Общую компоновку базовых блоков и подвижных исполнительных органов выполним аналогично компоновке, принятой для шлицефрезерных станков (рисунок 6).

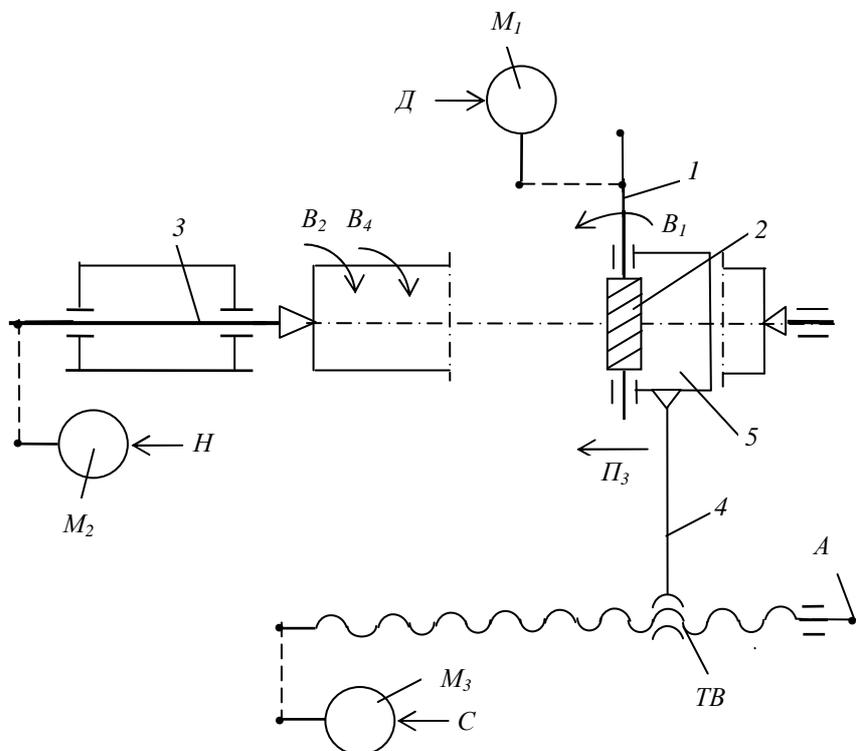


Рисунок 6. – Исполнительные органы структурной схемы станка

Управляемые электродвигатели (предпочтительно синхронные переменного тока  $M_1, M_2, M_3$ ) кинематически свяжем соответственно со шпинделем 1 червячной фрезы 2, шпинделем 3, несущим заготовку, и тяговым валом  $TB$ , выполненным в виде передачи винт-гайка с телами качения. Гайку тягового вала жесткой связью 4 соединим с суппортом 5, несущим шпиндель 1 червячной фрезы 2. Шпиндель червячной фрезы, шпиндель заготовки и суппорт червячной фрезы являются подвижными исполнительными органами станка.

На третьем этапе синтезируем систему синхронизации исполнительных органов на базе типовых интегральных схем (рисунок 7). Общим задатчиком для исполнительных органов служит эталонный генератор 1, вырабатывающий задающий импульсный сигнал, частота которого превышает частоту импульсных сигналов – аналогов частот вращения шпинделя червячной фрезы, шпинделя заготовки и тягового вала. Эталонный генератор 1 соединим с входами делителей частоты, выполненных в виде счетчиков 2, 3, 4, 5 и соединенных с ними блоков установки коэффициентов деления соответственно 6, 7, 8, 9. Функция этих блоков – установка передаточных отношений при наладке станка. Выход счетчика 2 соединим с входом блока 10 круговой частоты шпинделя фрезы в движении  $B_1$ . Выход блока 10 посредством предварительного усилителя 11 соединим с усилителем мощности 12, а выход этого усилителя соединим с управляемым электродвигателем  $M_1$  (см. рисунок 6) привода вращения фрезы.

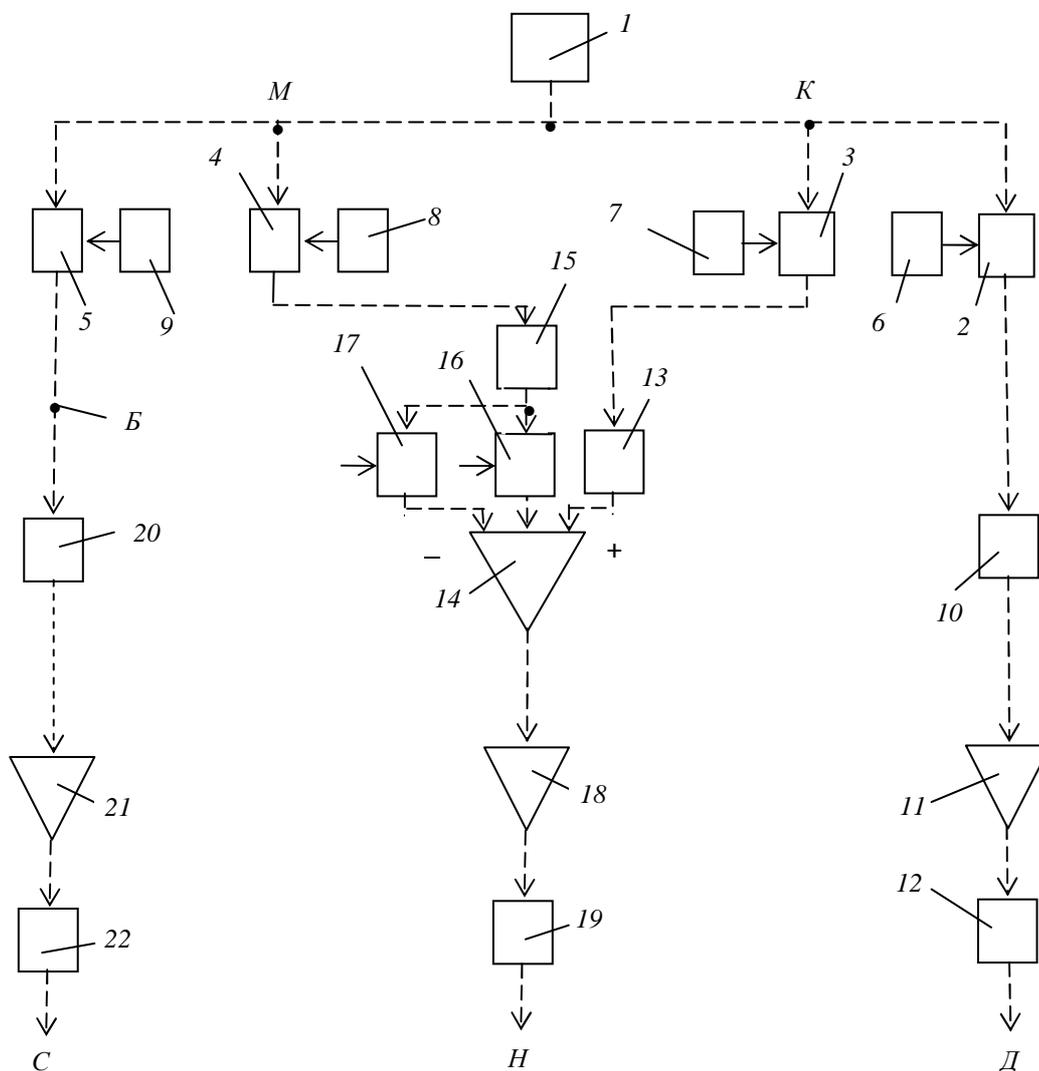


Рисунок 7. – Система синхронизации исполнительных органов станка по схеме равнозначных координат

Выход счетчика 3 соединим с входом блока 13 круговой частоты шпинделя заготовки в движении  $B_2$ , выход которого соединим с первым входом сложения параллельного сумматора 14. Выход счетчика 4 соединим с входом блока 15 круговой частоты шпинделя заготовки в движении  $B_4$ , у которого выход

соединен с входами ключей 16 и 17, управляемых положительным потенциалом. Выходы этих ключей соединим соответственно со вторым входом сложения и входом вычитания параллельного сумматора 14. Выход параллельного сумматора 14 соединим через предварительный усилитель 18 и усилитель мощности 19 с управляемым электродвигателем  $M_2$  (см. рисунок 6) привода вращения шпинделя заготовки.

Выход счетчика 5 соединим с входом блока 20 круговой частоты ведущего звена тягового вала  $TB$ , преобразующего вращательное движение в продольную подачу  $П_3$  суппорта 5. Выход блока 20 посредством предварительного усилителя 21 соединим с усилителем мощности 22. Выход этого усилителя соединим с управляемым электродвигателем  $M_3$  (см. рисунок 5) привода продольной подачи суппорта.

Блоки 10, 13, 15, 20 круговых частот соответственно шпинделя фрезы, шпинделя заготовки, винта тягового вала выполняются одинаково по схеме «частота – напряжение». В этих блоках задающие импульсные сигналы преобразуются в напряжение, пропорциональное частоте входного сигнала. Функциональное назначение блоков – задание скорости резания в движении  $B_1$  шпинделя червячной фрезы, суммарной круговой подачи шпинделя заготовки в движении  $B_2 \pm B_4$ , продольной подачи в движении  $П_3$  суппорта червячной фрезы.

Запишем связи проектируемой гибридной структурной схемы станка на языке символов, принятом в станковедении.

Группа  $\Phi_1(B_1B_2)$ . Ее внутренняя связь – мехатронная цепь, связывающая червячную фрезу и обрабатываемую заготовку:

$$B_1 \rightarrow 1 \rightarrow M_1 \rightarrow A \rightarrow 12 \rightarrow 11 \rightarrow 10 \rightarrow 2 \rightarrow \text{разъем } K \rightarrow 3 \rightarrow 13 \rightarrow 14 \rightarrow 18 \rightarrow 19 \rightarrow H \rightarrow M_2 \rightarrow B_2.$$

Внешняя связь: *Эталонный генератор*  $1 \rightarrow \text{разъем } K$ .

Группа настраивается на два параметра: на траекторию – делителем частоты (3...7); на скорость резания – делителем частоты (2...6).

Группа  $\Phi_3(П_3B_4)$ . Ее внутренняя связь – мехатронная цепь, связывающая червячную фрезу и обрабатываемую заготовку:

$$П_3 \rightarrow 5 \rightarrow TB \rightarrow M_3 \rightarrow C \rightarrow 22 \rightarrow 21 \rightarrow 20 \rightarrow 5 \rightarrow \text{разъем } M \rightarrow 4 \rightarrow 15 \rightarrow 16,$$

или  $17 \rightarrow 14 \rightarrow 18 \rightarrow 19 \rightarrow H \rightarrow M_2 \rightarrow B_2$ .

Внешняя связь:

*Эталонный генератор*  $1 \rightarrow \text{разъем } M$ .

Группа настраивается на четыре параметра: на траекторию – делителем частоты (4...8); на скорость подачи – делителем частоты (5...9); на путь и исходное положение – программно.

Согласно нормативам резания при шлицефрезеровании червячными фрезами скорость резания принимается по круговой частоте фрезы (движение  $B_1$ ), а подача по ее перемещению параллельно оси заготовки (движение  $П_3$ ). При наладке станка блоком 6 установки коэффициента деления задают частоту импульсного сигнала на выходе счетчика 2, соответствующую заданной скорости резания. Аналогично блоком 9 установки коэффициента деления задают частоту импульсного сигнала на выходе счетчика 5, соответствующую заданной подаче.

РП для исполнительных органов станочного зацепления, воспроизводящего движение обката  $\Phi_v(B_1B_2)$ :

$$1 \text{ об. шпинделя 1 фрезы } (B_1) \rightarrow \kappa/z \text{ об. шпинделя 3 заготовки } (B_2),$$

где  $\kappa$  – число заходов червячной фрезы;  $z$  – число нарезаемых шлицев.

УКЦ станочного зацепления:

$$\kappa/z = I \cdot c_1 \cdot n_1 / n_2,$$

где  $c_1$  – произведение передаточных отношений постоянных механических передач кинематической связи;  $n_1$  – круговая частота электродвигателя  $M_1$ , соответствующая заданной скорости резания,  $\text{мин}^{-1}$ ;  $n_2$  – круговая частота электродвигателя  $M_2$ , необходимая для обеспечения функциональной связи в движении обката,  $\text{мин}^{-1}$ .

Заменим в УКЦ отношение круговых частот отношением коэффициентов деления на соответствующих блоках. Тогда

$$\kappa/z = I \cdot c_1 \cdot i_2 / i_3.$$

По этому выражению определим коэффициент деления (ФН), устанавливаемый на делителе частоты (3...7):

$$i_3 = (c_1 z / \kappa) i_2,$$

где  $i_2$  – коэффициент деления, установленный на делителе частоты (2...6), соответствующий заданной круговой частоте электродвигателя  $M_1$  (скорости резания);  $i_3$  – коэффициент деления, который необхо-

димо установить на делителе частоты (3...7) для обеспечения функциональной связи шпинделя фрезы и шпинделя заготовки.

РП для исполнительных органов станочного зацепления, воспроизводящего винтовое движение  $\Phi_s(P_3 B_4)$ :

$$P \text{ мм перемещения суппорта } 5 (P_3) \rightarrow 1 \text{ об. шпинделя } 3 (B_4).$$

УКЦ станочного зацепления:

$$I = (P / P_{ТВ} \cdot (n_3 / n_2) \cdot c_2,$$

где  $P$  – шаг винтовой линии нарезаемых шлицев;  $P_{ТВ}$  – шаг тягового вала;  $c_2$  – произведения постоянных механических передач кинематической связи;  $n_3$  – круговая частота электродвигателя  $M_3$ , соответствующая заданной подаче, мм/мин;  $n_2$  – круговая частота электродвигателя  $M_2$ , необходимая для обеспечения функциональной связи в винтовом движении, мм/мин.

Заменим в УКЦ отношение круговых частот отношением коэффициентов деления на соответствующих блоках:

$$I = (P / P_{ТВ}) \cdot (i_5 / i_4) \cdot c_2.$$

Из этого выражения определим коэффициент деления (ФН), устанавливаемый на делителе частоты (4...8):

$$i_4 = (c_2 T / P) i_5,$$

где  $i_4$  – коэффициент деления, который необходимо установить на делителе частоты (4...8) для обеспечения функциональной связи суппорта и шпинделя заготовки;  $i_5$  – коэффициент деления, установленный на делителе частоты (5...9), соответствующий заданной круговой частоте электродвигателя  $M_3$  (скорости подачи).

Шпиндель заготовки является исполнительным органом обоих станочных зацеплений. При работе устройства результирующая круговая частота этого шпинделя представляет собой математическую сумму  $B_2 \pm B_4$  двух движений  $B_2$  и  $B_4$ , образующих совместно соответственно с движениями  $B_1$  и  $P_3$  движение обката ( $B_1 B_2$ ) и винтовое движение ( $P_3 B_4$ ). Выбор знака в математической сумме движений зависит от направления винтовых линий шлицев и червячной фрезы. Знак «плюс» соответствует условию, когда винтовые линии одноименные (например, обе левые); знак «минус» соответствует условию, когда винтовые линии разноименные (например, одна правая, а другая левая). Необходимый знак устанавливается при наладке устройства подачи управляющего сигнала на потенциальный вход ключа 16 или ключа 17.

Станок работает следующим образом. При включении эталонного генератора 1 задающий высокочастотный импульсный сигнал с его выхода поступает на счетчики 2, 3, 4, 5 делителей частоты, в которых происходит деление задающего сигнала в соответствии с коэффициентами деления, установленными на блоках задания этих коэффициентов 6, 7, 8, 9.

Импульсный сигнал с выхода счетчика 2 поступает на вход блока 10 круговой частоты шпинделя фрезы, где происходит его преобразование в напряжение, пропорциональное частоте входного сигнала. С выхода блока 10 сигнал через предварительный усилитель 11 и усилитель мощности 12 сообщается управляемому электродвигателю  $M_1$  (см. рисунок 6), который сообщает вращательное движение  $B_1$  шпинделю фрезы с круговой частотой, соответствующей заданной скорости резания. Синхронно с выхода счетчика 3 импульсный сигнал поступает на вход блока 13 круговой подачи шпинделя заготовки в движении  $B_2$ , где происходит его преобразование в напряжение, пропорциональное частоте. Выходной сигнал с блока 13 поступает на первый вход сложения параллельного сумматора 14. Синхронно с выхода счетчика 4 импульсный сигнал поступает на вход блока 15 круговой подачи шпинделя заготовки в движении  $B_4$ , где происходит его преобразование в напряжение, пропорциональное частоте. Выходной сигнал с блока 15 поступает в зависимости от знака математического сложения движений  $B_2$  и  $B_4$  на одном исполнительном органе или через ключ 16 на второй вход сложения параллельного сумматора 14, или через ключ 17 на вход вычитания этого параллельного сумматора. С выхода параллельного сумматора 14 результирующий сигнал через предварительный усилитель 18 и усилитель мощности 19 сообщается управляемому электродвигателю  $M_2$  (см. рисунок 6), который сообщает вращательное движение  $B_2 \pm B_4$  круговой подачи шпинделю заготовки с круговой частотой, согласованной с движениями  $B_1$  и  $P_3$  червячной фрезы. Синхронно с выхода счетчика 5 импульсный сигнал поступает на вход блока 20 продольной подачи суппорта в движении  $P_3$ , где происходит его преобразование в напряжение, пропорциональное частоте входного сигнала. Выходной сигнал с блока 20 через предварительный усилитель 21 и усилитель мощности 22 сообщается управляемому электродвигателю  $M_3$  (см. рисунок 6), который посредством тягового вала  $ТВ$  сообщает движение  $P_3$  суппорту фрезы, пропорциональное частоте сигнала на выходе делителя частоты 5. В итоге описанного прохождения сигнала от общего задатчика (эталонного генератора 1) к трем исполнительным органам: шпинделю червячной фрезы, шпинделю заготовки, суппорту червяч-

ной фрезы, образующим два станочных зацепления, происходит воспроизведение профиля и винтовой линии по длине шлицев на обрабатываемой заготовке.

На станке можно обрабатывать также шлицевые поверхности с прямыми шлицами. Для этого достаточно отключить делитель частоты (4...8). В результате сложное двухэлементарное движение продольной подачи суппорта  $\Phi_s(P_3B_4)$ , а следовательно и соответствующая формообразующая группа коммутируются к виду  $\Phi_s(P_3)$ .

Выше при функциональном проектировании кинематической структуры станка для нарезания резьбы решалась также задача устранения отрицательного влияния девиации механики подачи инструментального суппорта на качество обрабатываемой поверхности. Используемый для этого формирователь сигнала коррекции задающего сигнала (см. рисунок 4) без изменений можно включить и в проектируемую структурную схему. Для этого необходимо на тяговом валу  $TB$  (см. рисунок 6, позиция  $A$ ) установить импульсный измерительный преобразователь и соединить его с входом  $A$  формирователя сигнала коррекции (см. рисунок 4, позиция  $A$ ). Вход  $B$  этого формирователя необходимо соединить со счетчиком 5 (см. рисунок 7, позиция  $B$ ). Из схемы синхронизации необходимо исключить предварительный усилитель 21, а выход импульсно-аналогового преобразователя 20 соединить с первым входом сложения параллельного сумматора 6 (см. рисунок 4) формирователя сигнала коррекции. Выход параллельного сумматора необходимо соединить с усилителем мощности 22.

Уместно отметить, что мехатронная структурная схема шлицефрезерного станка, разработанная по методике функционального проектирования, признана изобретением [6].

**Заключение.** В результате проведенного исследования рассмотрено использование функционального проектирования кинематической структуры станочного оборудования с ЧПУ, содержащего сложные мехатронные формообразующие группы, по закону его функционирования, задаваемому соответствующим виртуальным техническим решением, а именно способом формообразующей обработки. Предложена методика настройки мехатронных формообразующих групп на траекторию сложного формообразующего движения и его скорость. Показано, что такой подход при использовании функционального проектирования в процессе познания станочного оборудования с ЧПУ стимулирует творческое мышление при изучении реальных технических решений.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Федотенок, А.А. Кинематическая структура металлорежущих станков. – Изд. 2-е / А.А. Федотенок. – М.: Машиностроение, 1970.
2. Голембиевский, А.И. Эволюция познания и методики преподавания дисциплины металлорежущие станки / А.И. Голембиевский // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В. Промышленность. Прикладные науки. – 2016. – № 3. – С. 2–11.
3. Голембиевский, А.И. Функциональное проектирование в методике познания дисциплины «Металлорежущие станки» / А.И. Голембиевский // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В, Промышленность. Прикладные науки. – 2018. – № 11. – С. 2–9.
4. Голембиевский, А.И. Системология способов формообразующей обработки в машиностроении / А.И. Голембиевский. – Новополоцк: Полоц. гос. ун-т, 2017. – 236 с.
5. Зубодолбежный станок с ЧПУ: а. с. SU 1366360 / А.И. Голембиевский. – Оpubл. 1988.
6. Устройство для синхронизации приводов исполнительных органов шлицефрезерного станка: пат. BY 16976 / А.И. Голембиевский. – Оpubл. 26.12.2012.

Поступила 14.12.2018

#### FUNCTIONAL DESIGN IN THE COGNITION METHOD MACHINE EQUIPMENT WITH NUMERIC PROGRAM CONTROL

A. GOLEMBIEVSKY

*The use of the functional design of the kinematic structure of CNC machine tools containing complex mechatronic forming groups is considered. The operation of the equipment according to the law specified by the corresponding virtual technical solution – by means of formative processing. The iterative nature of functional design. The method of setting up mechatronic forming groups on the trajectory of a complex forming movement and its speed is proposed. The problem of eliminating the negative influence of the deviation of the mechanics of the executive bodies on the quality of the treated surface is being solved.*

**Keywords:** machine equipment with numerical control, functional design, setting up mechatronic forming groups, settings, deviating the mechanics of executive bodies, eliminating deviation.

УДК 621.866+004.7

**ГРАНИЦЫ ПРИМЕНИМОСТИ АЛГОРИТМА РАЗРЕЖЕННОЙ ДЕКОМПОЗИЦИИ СИГНАЛОВ ВИБРАЦИИ ПО ИЗБЫТОЧНОМУ ВЕЙВЛЕТНОМУ СЛОВАРЮ****Ю.П. АСЛАМОВ; канд. тех. наук И.Г. ДАВЫДОВ***(Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск)*

*Рассмотрены вопросы, связанные с определением границ применимости алгоритма разреженной декомпозиции сигналов вибрации по избыточному вейвлетному словарю для оценки технического состояния роторного оборудования. Выделены основные факторы, оказывающие влияние на результаты анализа временной структуры вибрационных сигналов с использованием алгоритма разреженной вейвлетной декомпозиции. Представлены результаты проведенных экспериментальных исследований на модельных и вибрационных сигналах.*

**Ключевые слова:** *вибродиагностика, разреженная декомпозиция, вейвлет, избыточный словарь.*

**Введение.** Вопрос контроля работоспособности промышленного оборудования является актуальным, так как позволяет уменьшить эксплуатационные расходы предприятий. Системы вибрационной диагностики осуществляют оценку технического состояния оборудования на основе анализа генерируемых им сигналов вибрации, в которых заключен значительный объем диагностической информации о неисправностях этого оборудования.

Ввиду быстрого развития вычислительной техники, методов численного анализа и машинного обучения к современным системам вибрационной диагностики предъявляется ряд новых требований [1], главными из которых выступают: поиск конкретных неисправностей оборудования; работа с его ресурсом; полностью автоматическая обработка данных.

Большинство используемых в настоящее время в практике вибрационной диагностики методов анализа вибрации не удовлетворяют в полном объеме обозначенным требованиям. Так, одна часть методов нацелена лишь на интегральную оценку технического состояния оборудования, т.е. не позволяет обнаруживать конкретные его неисправности; вторая – ориентирована на эксперта-вибродиагноста, т.е. не способна в автоматическом режиме принимать решения о наличии неисправностей; третья – ориентирована на алгоритмы машинного обучения, но не инвариантна ни к типу оборудования, ни к режиму его работы.

Следует отметить, что большой объем качественно новой диагностической информации о техническом состоянии элементов оборудования заключен во временной структуре вибрационных сигналов. При этом наибольшую эффективность анализ временной структуры имеет при диагностике таких элементов роторного оборудования, как подшипники качения и зубчатые передачи. Однако в практике вибрационной диагностики такого рода анализ используется также крайне редко и носит субъективный характер (зависит от опыта эксперта-вибродиагноста). Причиной этому является слабая освещенность вопроса анализа временной структуры вибрационных сигналов в отечественной и зарубежной литературе, отсутствие инструментария эффективного описания временных реализаций вибрационных сигналов и потенциально высокая вычислительная сложность такой обработки.

Ранее авторами [2] был предложен алгоритм разреженной декомпозиции сигналов вибрации по избыточному вейвлетному словарю для оценки технического состояния промышленного оборудования на основе анализа временной структуры вибрационных сигналов. Цель настоящей работы – определение границ применимости указанного алгоритма. Однако первоначально необходимо рассмотреть вопросы, связанные с принципами функционирования алгоритма разреженной вейвлетной декомпозиции.

**Основная часть.** Одно из основных препятствий на пути создания методов автоматического анализа временной структуры вибрационных сигналов – отсутствие способов компактного и эффективного их представления. Широко используемое частотно-временное представление сигналов в виде скейлограммы или спектрограммы является избыточным, так как для описания с его помощью информативной в вибродиагностике области частот от нескольких герц до десятков килогерц требуется значительное количество информации (коэффициентов). По этой причине для эффективного представления временных реализаций вибрации авторами [3] предложено использовать принципы разреженного представления, в соответствии с которыми сигнал  $x(t)$  может быть представлен набором базисных частотно-временных функций, обладающих определенной собственной частотой, амплитудой и временным положением:

$$x_M(t) = \sum_{m=1}^M \sum_{i=1}^{n_m} c_i^m g_m(t - \tau_i^m), \quad (1)$$

где  $g_m \in \mathbf{L}(R^2)$  – частотно-временная функция (атом);  $c_i^m$  и  $\tau_i^m$  – амплитуда и временное положение  $i$ -того экземпляра функции  $g_m$  соответственно;  $n_m$  – количество экземпляров базисной функции  $g_m$ ;  $x_M(t)$  – сигнал аппроксимации.

Разреженность представления (1) будет тем выше, чем более неравномерно будет распределена энергия сигналов во временной области и чем лучше базисные функции будут адаптированы к сигнальным фрагментам. Вибрационные сигналы – это сложные комплексные структуры, поэтому для повышения разреженности (эффективности) их представления авторами предложено формировать крупные словари, состоящие из большого числа типов базисных функций для выделения свойственных сигналу фрагментов.

В ходе анализа вибрационных сигналов подшипников качения и зубчатых передач укрупненно было выделено четыре типа основных информативных сигнальных фрагментов вибрации, участвующих в процессах дефектообразования: экспоненциальные, модуляционные, синусоидальные и шумовые.

Под *экспоненциальными* сигнальными фрагментами понимаются короткие экспоненциальные ударные импульсы в подшипниках качения [4]. Под *модуляционными* – фрагменты амплитудно-модулированных колебаний или сигналов биений [5], а также симметричные короткие ударные импульсы с гауссовой огибающей. Под *синусоидальными* – фрагменты гармонического колебания [5]. Под *шумовыми* понимаются некоррелированные короткие сигнальные фрагменты вибрации, которые не могут быть отнесены ни к одному из предыдущих трех типов.

В качестве базисных частотно-временных функций для выделения основных сигнальных фрагментов вибрации предложено использовать вейвлет-функции, обладающие определенной временной структурой (формой), ограниченные и локализованные по времени и по частоте, способные масштабироваться и обладающие высокой чувствительностью к изменению временной структуры вибрационных сигналов.

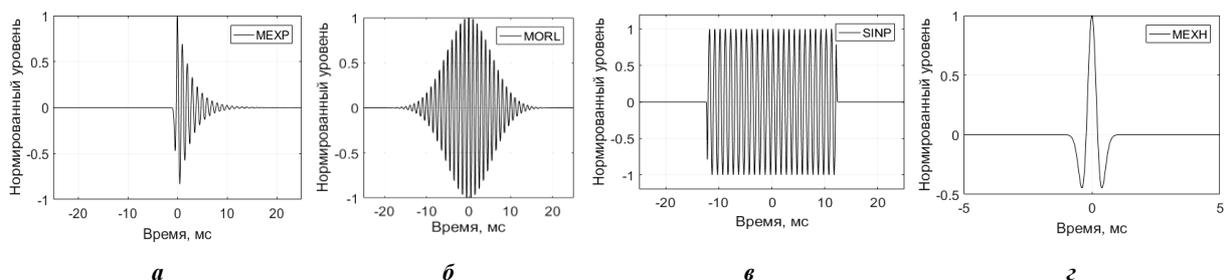
Однако количество осцилляций в пределах анализируемых сигнальных фрагментов вибрации может варьироваться. Например, количество осцилляций в пределах экспоненциальных ударных импульсов в сигналах вибрации подшипника качения зависит от места установки датчика вибрации, добротности системы, нагрузки, типа дефекта, его величины [6] и т.д. Вейвлеты не способны адаптироваться к таким изменениям. Для устранения данного недостатка в математическое выражение для вейвлет-функций введен дополнительный коэффициент с условным названием «коэффициент формы»  $FF$  (от англ. *Form Factor*) [7]. При этом увеличение значения  $FF$  приводит к увеличению количества осцилляций в пределах вейвлета.

Для выделения *экспоненциальных* сигнальных фрагментов вибрации разработан вейвлет  $MEXP$  [7], имитирующий экспоненциальные ударные импульсы в подшипниках качения и основанный на базисной функции, описанной И.Г. Давыдовым [8]. Для выделения *модуляционных* сигнальных фрагментов разработаны вейвлеты  $AMP$  и  $BP$ , а на основе модификации *Morlet* – вейвлет  $MORL$  [9]. Для выделения *синусоидальных* сигнальных фрагментов вибрации разработан вейвлет  $SINP$  [9]; для шумовых некоррелированных сигнальных фрагментов вибрации предложено использовать вейвлет-функцию  $MEXH$ , которая представляет собой модификацию вейвлет-функции *Mexican Hat*.

Показано [10], что на основе функций  $MEXP$ ,  $AMP$ ,  $BP$ ,  $MORL$  и  $SINP$  посредством изменения их коэффициента формы  $FF$  могут быть получены вейвлет-семейства, члены которых удовлетворяют требованиям вейвлет-функций, если их коэффициент формы  $FF$  превышает определенное минимальное пороговое значение. Для каждого семейства получены минимальные значения коэффициента формы:

$$FF_{min}^{MEXP} = 0,88; FF_{min}^{AMP} = 2,25; FF_{min}^{BP} = 3,36; FF_{min}^{MORL} = 0,75; FF_{min}^{SINP} = 1,0.$$

Минимальные пороговые значения коэффициента формы индивидуальны для каждого семейства и определяют его границы применимости. При значениях коэффициента формы  $FF$  ниже порогового вейвлеты вырождаются в одиночные всплески и утрачивают свои свойства: увеличивается среднее значение (нулевой момент), смещается значение собственной частоты, растекается Фурье-образ и т.д. При этом для выделения экспоненциальных, модуляционных, синусоидальных и шумовых сигнальных фрагментов вибрации предложено использовать вейвлет-функции  $MEXP$ ,  $MORL$ ,  $SINP$  и  $MEXH$  соответственно. Временные реализации указанных вейвлетов с собственной частотой  $f_0 = 1,0$  кГц представлены на рисунке 1.



**а** – вейвлет-функция  $MEXP$  ( $FF = 4$ ); **б** – вейвлет-функция  $MORL$  ( $FF = 32$ );  
**в** – вейвлет-функция  $SINP$  ( $FF = 8$ ); **г** – вейвлет-функция  $MEXH$

**Рисунок 1.** – Вейвлет-функции для анализа временной структуры вибрации

Выбор вейвлет-функций *MEXP*, *MORL*, *SINP* и *MEXH* обусловлен результатами сравнительного анализа их вейвлет-семейств, проведенного в терминах корреляционного отклика [2]. Под корреляционным откликом понимается зависимость величины коэффициента взаимной корреляции вейвлета или вейвлет-семейства с набором тестовых воздействий одного типа временной структуры от протяженности указанных тестовых воздействий. В результате экспериментальных исследований выявлено следующее:

- 11,5%-ным преимуществом в выделении экспоненциальных сигнальных фрагментов вибрации обладает вейвлет-семейство *MEXP*;
- 8%-ным преимуществом в выделении модуляционных сигнальных фрагментов вибрации обладает вейвлет-семейство *MORL*;
- 18,5%-ным преимуществом в выделении синусоидальных сигнальных фрагментов вибрации обладает вейвлет-семейство *SINP*;
- 12,5%-ным преимуществом в выделении шумовых некоррелированных сигнальных фрагментов вибрации обладает вейвлет *MEXH*.

Для разреженного описания временной структуры вибрационных сигналов подшипников качения и зубчатых передач предложена методика формирования избыточного словаря  $D$ , состоящего из вейвлет-семейств *MEXP*, *MORL*, *SINP* и вейвлета *MEXH*. В соответствии с методикой количество вейвлетов в пределах каждого семейства должно быть равным, а количество осцилляций в пределах вейвлет-функций каждого семейства словаря должно увеличиваться кратно степени одной двойки [2].

Минимальное количество осцилляций в пределах вейвлет-функций словаря выбрано на уровне  $N_{osc.min}^D \approx 4,35$  (осц.), что обусловлено минимальными пороговыми значениями коэффициента формы *FF* для каждого вейвлет-семейства. Максимальное количество осцилляций в пределах вейвлет-функций словаря математически не ограничено и было выбрано на уровне  $N_{osc.max}^D = 96,8$  (осц.) из расчета, что в большинстве практических приложений количество зубьев на шестернях не превышает 100 шт.

Сформированный таким образом словарь  $D = \{\psi_m\}_{m \in N}$  состоял из 30 базисных функций и был обозначен как *избыточный вейвлетный словарь*. Вейвлетный словарь  $D$  может быть интерпретирован как решетка «форма-длина», по оси «форма» которого отложены типы вейвлет-семейств (форма), а по оси «длина» – количество осцилляций в пределах каждого вейвлета.

На рисунке 2 введены следующие обозначения:  $N_{osc,0}^V$  – минимальное количество осцилляций в пределах вейвлетов семейств *MEXP*, *MORL* и *SINP*;  $N$  – количество осцилляций в пределах вейвлета *MEXH*,  $N_{osc}^{MEXH} = 1,43$  (осц.).

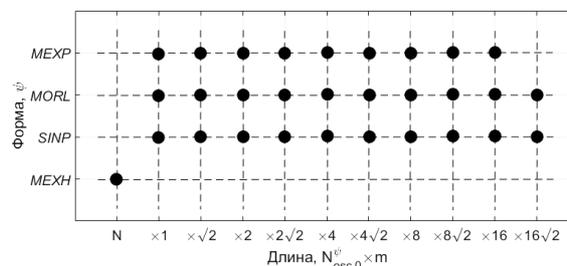


Рисунок 2. – Избыточный вейвлетный словарь  $D$  в виде решетки «форма-длина»

Представленный на рисунке 2 словарь  $D$  в литературе принято называть «избыточным» (*redundant dictionary*) [11], так как для описания сигнала в окрестности частоты  $f_0$  используется не одна, а тридцать базисных функций. Однако применение полученного словаря ко всей информативной в вибродиагностике области частот от нескольких герц до десятков килогерц сопряжено с высокими вычислительными затратами. Поэтому разумным видится анализировать временную структуру вибрации только в пределах небольшого числа энергетически выраженных частотных областей сигнала, которые могут быть определены, например, на основе анализа скейлограммы сигнала [12].

Для формирования компактного описания временной структуры вибрационных сигналов в пределах выбранной частотной области на основе избыточного вейвлетного словаря авторами предложен алгоритм разреженной вейвлетной декомпозиции (РВД).

**Алгоритм разреженной вейвлетной декомпозиции.** Алгоритм представляет собой итерационную процедуру, на каждом шаге которой из сигнала  $x(t)$  вычитается наиболее подходящая вейвлет-функция избыточного словаря  $D$ , фиксируются ее тип  $\psi_m$ , амплитуда  $c_i^m$  и временное положение  $\tau_i^m$ . В результате работы алгоритма формируется разреженное представление временной структуры вибрационного сигнала.

ла в виде суперпозиции набора вейвлет-функций  $\mathbf{X} = \{\psi_m, c_i^m, \tau_i^m\}_{(m,i) \in N^2}$ . В свою очередь, компактное описание временной структуры вибрационного сигнала  $\mathbf{W}^{BF}$  может быть получено как распределение энергии сигнала между участвующими в его декомпозиции вейвлет-функциями словаря  $D = \{\psi_m\}_{m \in N}$ . По результатам проведенных экспериментальных исследований установлено, что использование разреженного представления позволяет до 1000 раз уменьшить необходимое для описания вибрационных сигналов количество информации (коэффициентов).

Остановка алгоритма разреженной вейвлетной декомпозиции происходит либо при достижении требуемой точности аппроксимации сигнала  $\eta \geq \eta_{max}$ , либо при достижении максимально допустимого количества итераций алгоритма декомпозиции  $i \geq I_{\eta_{max}}$ .

При этом точность аппроксимации  $\eta$  сигнала определяется из выражения:

$$\eta = 1 - \frac{\|x - x_M\|^2}{\|x\|^2} = 1 - \frac{e_M}{\|x\|^2}. \quad (2)$$

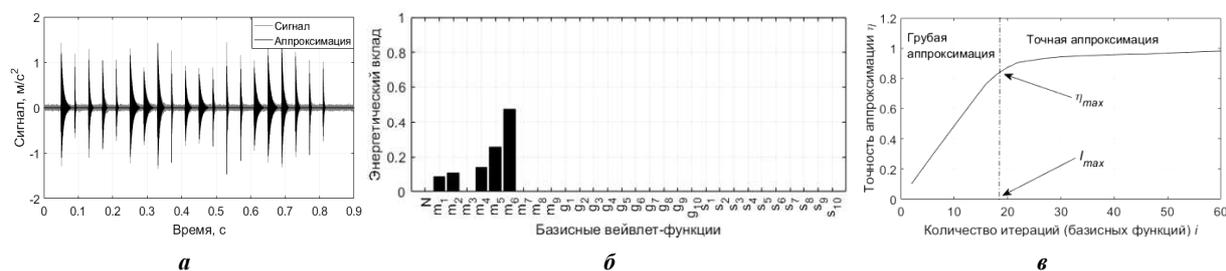
Здесь  $x(t)$  – оригинальный вибрационный сигнал;  $x_M(t)$  – аппроксимация сигнала;  $e_M$  – ошибка аппроксимации.

В свою очередь, максимально допустимое количество итераций алгоритма РВД  $I_{\eta_{max}}$  для аппроксимации сигнала с точностью  $\eta$  в окрестности частоты  $f_0$  определяется следующим образом:

$$I_{\eta_{max}} = \left\lceil \eta \cdot \frac{\omega_0 T}{2\pi} \cdot \frac{1}{N_{osc.min}^D} \right\rceil \times 2, \quad (3)$$

где  $\lceil p \rceil$  – оператор наименьшего целого  $n \geq p$ ;  $\omega_0$  – циклическая частота, [рад/с];  $T$  – длительность сигнала  $x(t)$ , [с];  $N_{osc.min}^D$  – минимальное эффективное количество осцилляций в пределах вейвлетов словаря  $D$ .

В качестве примера на рисунке 3, а изображен модельный сигнал вибрации с несущей частотой  $f_0 = 1,0$  кГц, представляющий собой последовательность экспоненциальных ударных импульсов различной протяженности. На рисунке 3, б приведено компактное описание его временной структуры, полученное на основе алгоритма разреженной вейвлетной декомпозиции. Вейвлет-функции словаря на рисунке 3, б имеют буквенно-численные обозначения [2]. Символом “N” обозначен вейвлет *MEXH*; символом “m” – вейвлеты семейства *MEXP*; символом “g” – вейвлеты семейства *MORL*; символом “s” – вейвлеты семейства *SINP*. Числом от 1 до 10 обозначен порядковый номер вейвлета в семействе, при этом с ростом индекса кратно увеличивается количество осцилляций в пределах вейвлетов (см. рисунок 2). На рисунке 3, в приведена типовая зависимость  $\eta(i)$  точности аппроксимации сигнала  $\eta$  от количества итераций алгоритма разреженной вейвлетной декомпозиции  $i$ .



а – модельный сигнал; б – компактное описание временной структуры сигнала;  
в – зависимость точности аппроксимации от количества итераций алгоритма РВД

Рисунок 3. – Анализ временной структуры последовательности экспоненциальных импульсов

В представленном на рисунке 3 примере большая часть энергии модельного сигнала сосредоточена на вейвлет-функциях семейства *MEXP*, что указывает на преобладание в сигнале экспоненциальных сигнальных фрагментов. Из рисунка 3, в следует, что для получения более точного описания временной структуры сигналов (большей точности аппроксимации) требуется большее количество итераций алгоритма декомпозиции. При этом кривую  $\eta(i)$  укрупненно можно разделить на интервалы «грубой» и «точной» аппроксимации.

На интервале «грубой» аппроксимации вейвлет-функциями избыточного словаря описываются основные энергетически выраженные сигнальные фрагменты, поэтому каждая итерация РВД в значительной степени влияет на точность аппроксимации. При этом значение точности аппроксимации на указанном интервале связано с количеством итераций алгоритма РВД по закону, близкому к линейному.

В свою очередь, на интервале «точной» аппроксимации каждая итерация алгоритма РВД описывает локальные невыраженные особенности временной структуры сигнала и не оказывает значительного влияния на точность аппроксимации  $\eta$ , поэтому имеет место насыщение кривой  $\eta(i)$ .

**Методика проведения эксперимента.** Для определения границ применимости алгоритма разреженной вейвлетной декомпозиции необходимо установить оптимальное значение точности аппроксимации  $\eta_{opt}$  вибрационных сигналов, а также оценить влияние погрешности определения положения выраженных частотных областей сигнала  $\delta f$ , отношения сигнал-шум  $SNR$ , значения частоты дискретизации сигналов  $F_s$ , а также скорости вращения функциональных узлов роторного оборудования  $S$  на результаты работы алгоритма разреженной вейвлетной декомпозиции.

Для выявления обозначенных зависимостей проведен ряд экспериментов с использованием модельных сигналов различной временной структуры [2] с несущей частотой  $f_0 = 1,0$  кГц, длительностью  $T = 10$  с, частотой дискретизации  $F_s = 96$  кГц и отношением сигнал-шум  $SNR = 60$  дБ.

В качестве модельных сигналов использовано гармоническое колебание единичной амплитуды «SIN» и амплитудно-модулированное колебание «AM» с индексом модуляции  $m = 0,5$  и частотой модулирующего колебания  $F = 40$  Гц. Также были рассмотрены модельные сигналы «EXP» и «EXP+» в виде последовательности экспоненциальных импульсов, определяемых выражением:

$$s_0^{EXP}(t, \omega_0, FF) = \begin{cases} A \sin(\omega_0 t) \cdot \exp\left(-\frac{2\pi FF}{\omega_0} t\right), & 0 \leq t < \infty; \\ 0, & -\infty < t < 0, \end{cases} \quad (4)$$

где  $\omega_0 = 2\pi f_0$  – циклическая несущая частота, [рад/с];  $FF$  – коэффициент формы сигнала;  $A$  – амплитуда импульсов. Частота следования экспоненциальных импульсов для модельных сигналов составляет  $F = 25$  Гц, а коэффициенты формы  $FF$  экспоненциальных импульсов (4) для сигналов «EXP» и «EXP+» соответственно равны  $FF^{EXP} = 2$  (~5 осцилляций в пределах импульса) и  $FF^{EXP+} = 16$  (~40 осцилляций в пределах импульса).

В ходе проведения экспериментальных исследований один из параметров модельных сигналов ( $f_0$ ,  $F_s$ ,  $SNR$ ) варьировался в заданном диапазоне. Для оценки влияния указанных параметров на результаты работы алгоритма РВД рассматривался внешний вид компактного описания временной структуры сигналов (визуальный осмотр). В свою очередь, для количественной оценки результатов работы алгоритма РВД предложено рассчитывать параметр *эффективности* РВД  $\xi_\eta$ :

$$\xi_\eta = 1 - \frac{I_\eta}{I_{\eta,max}}. \quad (5)$$

Здесь  $I_\eta$  и  $I_{\eta,max}$  – соответственно действительное и предельно допустимое количество итераций алгоритма разреженной вейвлетной декомпозиции для достижения точности аппроксимации сигнала  $\eta$ .

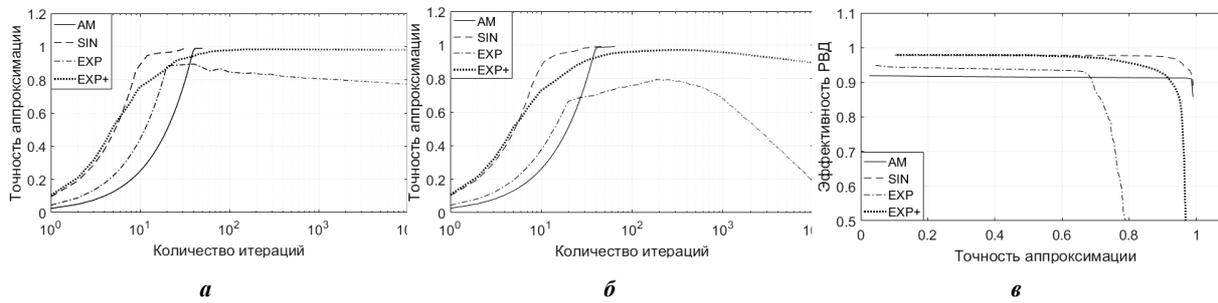
Эффективность алгоритма РВД для описания временной структуры сигнала с точностью  $\eta$  будет тем выше, чем меньшее количество итераций  $I_\eta$  алгоритм потребует. Так, на рисунке 3, в наибольшей эффективности алгоритма РВД будет соответствовать интервал «грубой» аппроксимации.

**Результаты и их обсуждение.** Ниже представлены результаты проведенных экспериментов, на основе которых установлены границы применимости алгоритма разреженной вейвлетной декомпозиции.

**1.** Для определения оптимальной для широкого класса сигналов точности аппроксимации  $\eta_{opt}$  проведен ряд экспериментов, подразумевающих аппроксимацию модельных сигналов «SIN», «AM», «EXP», «EXP+» с различной точностью  $\eta$  на базе алгоритма РВД. При этом отношение сигнал-шум модельных сигналов варьировалось в диапазоне  $SNR \in [0; +60]$  дБ.

На рисунках 4, а и б приведены зависимости точности аппроксимации модельных сигналов  $\eta(i)$  от количества итераций  $i$  алгоритма РВД при отношении сигнал-шум  $SNR = 60$  дБ и  $SNR = 3$  дБ соответ-

ственно. Зависимости эффективности алгоритма РВД  $\xi(\eta)$  от точности аппроксимации сигналов  $\eta$  при отношении сигнал-шум  $SNR = 3$  дБ представлены на рисунке 4, в.



**а** – зависимость точности аппроксимации  $\eta$  от количества итераций алгоритма РВД при  $SNR = +60$  дБ;  
**б** – зависимость точности аппроксимации  $\eta$  от количества итераций алгоритма РВД при  $SNR = +3$  дБ;  
**в** – зависимость эффективности алгоритма РВД от точности аппроксимации  $\eta$  при  $SNR = +3$  дБ

**Рисунок 4.** – Влияние точности аппроксимации сигналов  $\eta$  на результаты работы алгоритма РВД

Как видно из рисунков 4, *а* и *б*, точность аппроксимации модельных сигналов на уровне  $\eta = 0,99$  при различных отношениях сигнал-шум  $SNR$  достигнута только для гармонического колебания “SIN” и амплитудно-модулированного колебания “AM”. При этом наименьшая точность аппроксимации  $\eta_{min} = 0,8$  достигнута для наиболее широкополосного из модельных сигналов, а именно сигнала “EXP”.

По этой причине для декомпозиции широкого класса сигналов при различных отношениях сигнал-шум  $SNR$  предложено использовать точность аппроксимации  $\eta_{opt}$  на уровне  $\eta_{opt} \approx 0,6$ , при которой алгоритм разреженной вейвлетной декомпозиции имеет высокую эффективность  $\xi \geq 0,9$  (рисунок 4, *в*). Иными словами, предложено использовать «грубые» аппроксимации, при которых точность аппроксимации  $\eta$  квазилинейно связана с количеством итераций алгоритма разреженной вейвлетной декомпозиции  $i$  (рисунок 3, *в*).

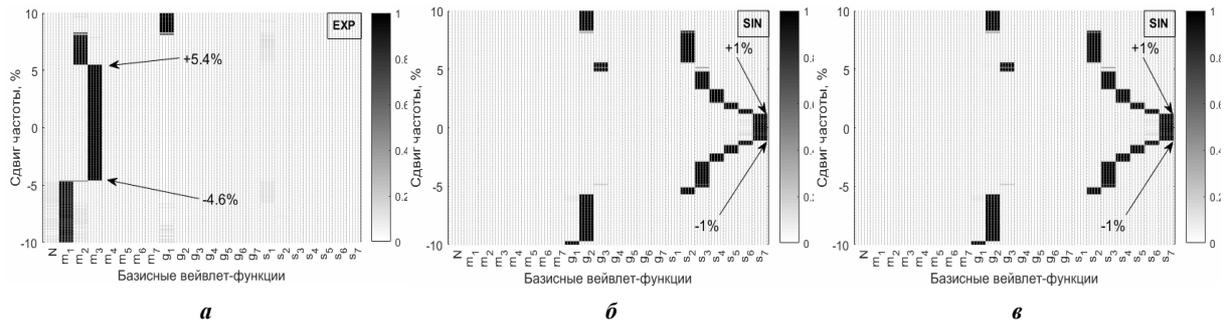
**2.** Как отмечалось ранее, разреженное представление сигнала вибрации на основе избыточного вейвлетного словаря  $D$  формируется в пределах значимой частотной области сигнала (с центральной частотой  $f_0$ ), выбор которой может, в частности, осуществляться на основе анализа скейлограммы сигнала. При этом положение частотной области (значение центральной частоты  $f_0$ ) может быть определено с погрешностью. Целью эксперимента являлась оценка влияния погрешности определения частоты  $f_0$  на результаты работы алгоритма разреженной вейвлетной декомпозиции.

Эксперимент проводился на базе модельных узкополосных сигналов “AM”, “SIN”, “EXP” и “EXP+” с несущей частотой  $f_0 = 1,0$  кГц и отношением сигнал-шум  $SNR = 60$  дБ. При этом избыточный вейвлетный словарь  $D$  алгоритма РВД был настроен на частоту  $f_0$ , смещенную относительно несущей частоты модельных сигналов  $f_0$  на величину  $\delta f$ . Величина смещения  $\delta f$  варьировалась в диапазоне  $\delta f (\%) \in [-10; +10] \%$  с шагом 0,1%. Для каждого значения  $\delta f (\%)$  была сформирована аппроксимация сигнала с точностью  $\eta = 0,6$  и компактное описание ее временной структуры, а также рассчитана эффективность алгоритма разреженной вейвлетной декомпозиции  $\xi$ .

На рисунке 5, *а* и *б* представлен соответственно внешний вид компактного описания временной структуры модельных сигналов “EXP” и “SIN” при различной погрешности определения их несущей частоты  $\delta f (\%)$ . На рисунке 5, *в* изображена зависимость эффективности алгоритма РВД от значения  $\delta f (\%)$ .

В соответствии с рисунком 5 можно сделать вывод, что при значительной погрешности определения несущей частоты модельных сигналов  $\delta f (\%)$  вейвлет-функции избыточного словаря настраиваются на смещенную частоту  $f_0$  и разреженная декомпозиция сигналов производится с использованием неверных вейвлет-функций. В результате значительно снижается эффективность РВД (рисунок 5, *в*) и имеет место отличное от требуемого компактное описание временной структуры вибрационных сигналов (рисунок 5, *а*, *б*).

В большинстве рассмотренных случаев неверное определение значения несущей частоты модельного сигнала приводит к смещению максимума компактного описания временной структуры в пределах одного вейвлет-семейства, однако при больших погрешностях определения частоты максимум может перейти и на другое вейвлет-семейство (рисунок 5, *а* и *б*).



**а, б** – компактное описание временной структуры сигналов “EXP” и “SIN”;  
**в** – кривая эффективности алгоритма РВД для сигнала “SIN”

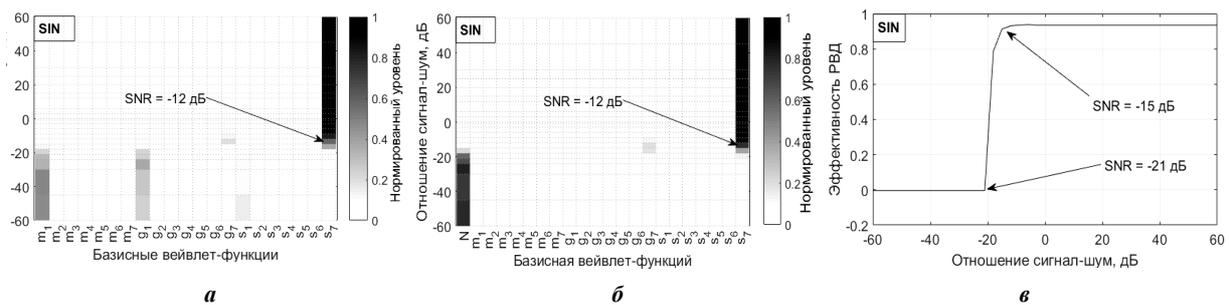
**Рисунок 5.** – Влияние погрешности определения частоты сигнала  $\delta f(\%)$  на результаты работы алгоритма РВД

Таким образом, в результате проведенных экспериментов сделано заключение, что чем меньшую полосу частот занимает анализируемый сигнал, тем меньшая погрешность определения его несущей частоты  $\delta f$  допустима. Поэтому максимально допустимая погрешность определения положения значимых частотных областей сигнала  $\delta f(\%) \leq 1\%$  для алгоритма РВД выбрана на основе анализа компактного описания временной структуры самого узкополосного из модельных сигналов – гармонического колебания “SIN” (рисунок 5, б).

**3.** Вибрационные сигналы, как правило, содержат значительную часть шумовой компоненты, влияние которой на результаты работы алгоритма РВД должно быть оценено. С этой целью рассмотрен внешний вид компактного описания временной структуры модельных сигналов при различных отношениях сигнал-шум  $SNR \in [-60; +60]$  дБ. Точность аппроксимации сигналов при этом установлена на уровне  $\eta = 0,6$ .

На рисунке 6, а и б представлено компактное описание временной структуры модельного сигнала “SIN” при различных отношениях сигнал-шум, причем на рисунке 6, а демонстрируется случай, когда в избыточном словаре отсутствует вейвлет-функция *MEXH* (*N*) для выделения шумовых сигнальных фрагментов.

На рисунке 6, в отображена зависимость эффективности алгоритма РВД  $\xi$  при использовании избыточного словаря *D* с вейвлетом *MEXH* в своем составе при различных отношениях сигнал-шум.



**а, б** – компактное описание временной структуры сигнала “SIN” в зависимости от *SNR*;  
**в** – кривая эффективности алгоритма РВД в зависимости от *SNR*

**Рисунок 6.** – Влияние отношения сигнал-шум *SNR* на результаты работы алгоритма РВД

Как показано на рисунке 6, а, при отсутствии в составе избыточного словаря *D* вейвлет-функции для выделения шумовых сигнальных фрагментов (*MEXH*) большая часть энергии сигнала при низких отношениях сигнал-шум распределяется между наиболее короткими вейвлетами семейств *MEXP*, *MORL* и *SINP* ( $m_1$ ,  $g_1$  и  $s_1$ ). В свою очередь, при наличии в составе словаря *D* вейвлет-функции *MEXH* при низких отношениях сигнал-шум, когда временная структура модельных сигналов неразличима на фоне шума, большая часть энергии сосредоточена на вейвлете *MEXH*, при этом по виду компактного описания временной структуры сигнала можно оценить удельный энергетический вклад шумовой компоненты. В соответствии с рисунком 6, в также можно заключить, что при низких отношениях сигнал-шум эффективность алгоритма РВД резко снижается. Причиной является то, что для аппроксимации

сигнала с заданной точностью  $\eta$  в этом случае используется вейвлет *MEXH* с малым количеством осцилляций в своих пределах ( $N_{osc}^{MEXH} = 1,43$ ).

4. Рассматриваемый в практике вибрационной диагностики сигнал вибрации представляет собой набор дискретных значений, период следования которых определяется частотой дискретизации  $F_s$  аналого-цифрового преобразователя (АЦП) датчика вибрации. При этом чем выше будет частота дискретизации  $F_s$  сигнала, тем точнее могут быть описаны особенности его временной структуры и тем выше будут вычислительные затраты при анализе сигнала. Поэтому необходимо определить минимально допустимое значение частоты дискретизации сигналов, при котором анализ их временной структуры возможен.

Как отмечалось выше, алгоритм разреженной вейвлетной декомпозиции анализирует временную структуру сигнала в пределах выбранной значимой частотной области с центральной частотой  $f_0$ . При этом заранее не известна ни полоса частот анализируемой области, ни ее верхняя граничная частота  $f_6$ . По этой причине вместо оценки минимально допустимого отношения  $F_s / f_6$ , при котором анализ временной структуры вибрационных сигналов на базе алгоритма разреженной вейвлетной декомпозиции возможен, рассмотрено отношение  $F_s / f_0$ .

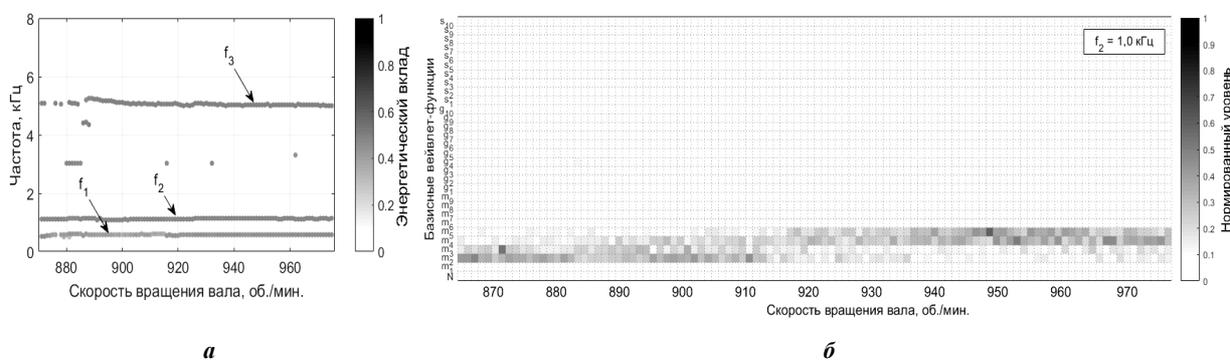
Для проведения экспериментов выбраны модельные сигналы “AM”, “SIN”, “EXP” и “EXP+” с несущей частотой  $f_0 = 1,0$  кГц и частотой дискретизации в диапазоне  $(F_s / f_0) \in [2; 128]$ . Каждый из представленных сигналов содержит фрагменты лишь одной временной структуры. Поэтому было рассмотрено минимальное отношение  $F_s / f_0$ , при котором большая часть энергии в компактном описании временной структуры модельных сигналов сосредоточена лишь на одной вейвлет-функции, а эффективность алгоритма РВД превышает  $\xi \geq 0,5$ . В рамках представленной работы приведены лишь результаты анализа.

Установлено, что для формирования корректного компактного описания временной структуры вибрационных сигналов на базе алгоритма РВД частота дискретизации АЦП датчика вибрации  $F_s$  должна как минимум в 16 раз превышать значение центральной частоты  $f_0$  анализируемой частотной области сигнала, т.е.  $F_s \geq 16f_0$ . Однако при использовании предварительной сплайн интерполяции вибрационного сигнала достаточной является частота дискретизации  $F_s \geq 4f_0$ . При несоблюдении полученных соотношений эффективность алгоритма РВД, как и в предыдущих случаях, снижается до близких к нулю значений.

5. Для оценки влияния скорости вращения элементов роторного оборудования на временную структуру генерируемых ими вибрационных сигналов проведено следующее исследование.

Сформирован набор из 90 вибрационных сигналов, каждый из которых снят при определенной скорости вращения подшипника  $S \in [865; 975]$  об/мин. Длительность вибрационных сигналов  $T = 10$  с; частота дискретизации составила  $F_s = 96$  кГц. Сигналы сняты с датчиков вибрации *B&R* с чувствительностью  $s_0 = 100$  мВ/г.

На рисунке 7, *а* представлены результаты мониторинга положения выделенных на основе алгоритма разреженной декомпозиции скейлограммы значимых частотных областей сигнала  $f_1 \approx 0,6$  кГц,  $f_2 \approx 1,0$  кГц и  $f_3 \approx 5,0$  кГц. Энергетический вклад каждой частотной области в общую энергетику сигнала превышал  $E_i \geq 10\%$ .



*а* – значимые частотные области сигнала вибрации;  
*б* – компактное описание временной структуры сигналов

Рисунок 7. – Влияние скорости вращения подшипника качения на временную структуру его сигналов вибрации

На рисунке 7, б отображены результаты мониторинга компактного описания временной структуры вибрационных сигналов в пределах частотной области  $f_2$ .

Из рисунка 7, а следует, что положение значимых частотных областей сигнала вибрации подшипника качения при увеличении скорости вращения подшипника существенно не изменяется. Данный факт объясняется тем, что рассмотренные частотные области являются резонансными и их центральные частоты определяются только габаритными параметрами подшипника [13]. При этом компактное описание временной структуры сигналов вибрации в значительной степени зависит от скорости вращения: с увеличением скорости вращения подшипника в 1,13 раза максимум компактного описания временной структуры его сигналов вибрации в пределах частотной области  $f_2$  сместился, как показано на рисунке 7, б, с вейвлета  $m_2$  на вейвлеты  $m_4$  и  $m_5$ . Иными словами, протяженность экспоненциальных ударных импульсов (количество осцилляций в пределах импульсов) увеличилась в два-три раза, при этом тип временной структуры сигналов остался прежним и описывается вейвлет-семейством *MEXP*. Полученный результат указывает на потенциально низкую эффективность мониторинга временной структуры вибрационных сигналов для оценки технического состояния оборудования с резко нестационарным режимом работы.

6. В результате проведенных исследований сделан вывод, что значение эффективности алгоритма разреженной вейвлетной декомпозиции  $\xi$  (5) может быть использовано для оценки качества анализируемого сигнала вибрации и оценки достоверности полученного для него компактного описания временной структуры. Данный факт обусловлен тем, что эффективность алгоритма РВД  $\xi$  принимает значения ниже  $\xi < 0,5$  в следующих случаях:

- а) невозможно достичь требуемой точности аппроксимации сигнала  $\eta$ ;
- б) низкое отношение сигнал-шум  $SNR$ , не позволяющее оценить временную структуру сигнала;
- в) высокая погрешность  $\delta f$  определения положения анализируемой энергетически выраженной частотной области сигнала;
- г) низкое значение частоты дискретизации АЦП датчика вибрации, не позволяющее корректно описать особенности временной структуры сигнала вибрации.

Таким образом, для формирования корректного компактного описания временной структуры вибрационных сигналов эффективность алгоритма разреженной вейвлетной декомпозиции в пределах выбранной частотной области должна превышать значения  $\xi \geq 0,5$ . При этом частотные области вибрационного сигнала, эффективность работы алгоритма РВД в пределах которых не достигает порогового значения  $\xi_0 = 0,5$ , считаются неинформативными и не подлежат рассмотрению.

**Заключение.** В итоге экспериментальных исследований получены следующие результаты:

- определены основные факторы, оказывающие влияние на результаты работы алгоритма разреженной декомпозиции сигналов вибрации по избыточному вейвлетному словарю, такие как значение частоты дискретизации сигналов, отношение сигнал-шум, скорость вращения функциональных узлов оборудования и другие);
- установлены границы применимости алгоритма декомпозиции.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Industry 4.0: Predictive Intelligent Maintenance for Production Equipment / S. Ferreiro [et al.] // European Conference of the Prognostics and Health Management Society. – 2016. – P. 8.
2. Асламов, Ю.П. Избыточный вейвлетный словарь для разреженной декомпозиции сигналов вибрации / Ю.П. Асламов, И.Г. Давыдов // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия С, Фундаментальные науки. – 2018. – № 4. – С. 86–94.
3. Smith, E. Efficient coding of time-relative structure using spikes: Neural Computation / E. Smith, M.S. Lewicki. – 2005. – Vol. 17, № 1. – P. 19–45.
4. McFadden, P.D. Model for the vibration produced by a single point defect in a rolling element bearing / P.D. McFadden, J.D. Smith // Journal of Sound and Vibration. – 1984. – Vol. 96, № 1. – P. 69–82.
5. Randall, R.B. A new method of modeling gear faults / R.B. Randall // Journal of Mechanical Design. – 1982. – Vol. 104, № 2. – P. 259–267.
6. Kogan, G. A new model for spall-rolling-element interaction. Nonlinear Dynamics / G. Kogan, J. Bortman, R. Klein // Nonlinear Dynamics. – 2016. – Vol. 87, № 1. – P. 219–236.
7. Асламов, Ю.П. Вейвлет-функция для диагностики подшипников качения / Ю.П. Асламов, И.Г. Давыдов // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В, Промышленность. Прикладные науки. – 2018. – № 11. – С. 14–22.

8. Давыдов, И.Г. Диагностика качества подшипников качения с применением вейвлет-анализа / И.Г. Давыдов, Л.М. Лыньков, В.Н. Левкович // Доклады БГУИР. – 2005. – № 3 (11). – С. 48–52.
9. Вейвлет-функции для диагностики зубчатых передач / Ю.П. Асламов [и др.] // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В, Промышленность. Прикладные науки. – 2018. – № 3. – С. 38–46.
10. Астафьева, Н.М. Вейвлет-анализ: основы теории и примеры применения / Н.М. Астафьева // Успехи физических наук. – 1996. – Т. 166, № 11. – С. 1145–1170.
11. Gribonval, R. Approximation with highly redundant dictionaries / R. Gribonval, M. Nielsen // Proceedings of SPIE. – 2003. – P. 216–227.
12. Эффективность использования скалограммы для оценки технического состояния роторного оборудования / Ю.П. Асламов [и др.] // Доклады БГУИР. – 2018. – № 2. – С. 12–17.
13. Мынцов, А.А. Применение метода огибающей для диагностики механических узлов оборудования [Электронный ресурс] / А.А. Мынцов // Вибродиагностика для начинающих и специалистов. – Режим доступа: <http://www.vibration.ru/pmodmuo/pmodmuo.shtml>.

Поступила 13.02.2019

#### LIMITS OF APPLICABILITY OF THE ALGORITHM FOR SPARSE DECOMPOSITION OF VIBRATION SIGNALS USING THE REDUNDANT WAVELET DICTIONARY

Y. ASLAMOV, I. DAVYDOV

*The article deals with issues related to determining the limits of applicability of the algorithm for sparse decomposition of vibration signals using the redundant wavelet dictionary for assessing the technical condition of rotary equipment. The main factors that influence the results of the vibration signals waveform analysis using the sparse wavelet decomposition algorithm are identified. The results of experimental studies on the model and vibration signals are presented.*

**Keywords:** vibration-based diagnostics, sparse decomposition, wavelet, redundant dictionary.

УДК 621.91.01

**МЕТОДОЛОГИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ МАТЕРИАЛОВ  
В СОВРЕМЕННЫХ УСЛОВИЯХ РАЗВИТИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ**

*д-р техн. наук, проф. Н.Н. ПОПОК  
(Полоцкий государственный университет)*

*Проанализированы современные тенденции и концепции развития машиностроения. Приведены методологические принципы проведения теоретических и экспериментальных исследований процесса резания, обобщенная кинематическая схема резания и схема формирования поверхностей, зависимости кинематических и физических характеристик процесса резания от условий обработки, подтверждающие их взаимосвязь. Описаны универсальные стенды и аппаратура для исследования обработки резанием применительно к станкам с числовым программным управлением, представлена общая структура технологической системы. Обосновано создание единой управляющей платформы процесса резания и самообучающихся систем.*

**Ключевые слова:** методология, машиностроение, процесс резания, кинематика, физические характеристики, станок с числовым программным управлением, самообучающаяся система.

**Введение.** Развитие науки о резании материалов определяется, с одной стороны, современными достижениями в области исследований физико-химических явлений, а с другой – происходящими техническими переменами в машиностроительном производстве. Исследования процесса резания по своей структуре, логической организации применяемых методов и средств должны учитывать происходящие изменения в фундаментальной науке и производственной деятельности.

В настоящее время эти достижения и изменения обобщены в концепциях технологических укладов (уклады I–VI) или промышленных революций («индустрия 1,0» – «индустрия 4,0») и развития образования («университет 1,0» – «университет 4,0») [1–5]. Технологический уклад – это совокупность сопряженных производств, имеющих одинаковый технический уровень и развивающихся синхронно. В 2010 году в развитых странах доля производительных сил четвертого технологического уклада (период интенсивного развития 1930–1970 гг.) составляла 20%, пятого (1970–2010 гг.) – 60% и прогнозного шестого (2010–2050 гг.) – 5%.

Примерно с 2002 года разрабатывается теория конвергенции – сближения, слияния каких-либо параметров и элементов в независимых друг от друга явлениях, которая предполагает объединение и синергетическое усиление наноразмерных, биологических, информационных и когнитивных (НБИК) технологий [6]. Результатом НБИК конвергенции будет полное слияние этих технологий в единую научно-технологическую область знания. Предполагается переход к природоподобным технологиям. При этом необходимо учитывать реализуемую в настоящее время концепцию устойчивого или гармоничного развития, предусматривающую баланс цивилизации и природы, в том числе инноваций, и восприимчивость к ним производства [7]. В связи с этим развивается теория мобильного производства, позволяющая обосновывать быстрый и с минимальными финансовыми затратами технологический переход предприятия к выпуску инновационной продукции [8]. Мобильные производства основываются на разработке технологических модулей – переходов операций технического процесса, учитывающих материалы, конструктивные элементы и поверхности детали, вид обработки резанием и его режимы, технологическое оборудование и оснастку. Для реализации технологических модулей и мобильного развития производства на их основе необходимо, чтобы оборудование и оснастка были многофункциональными [9]. Многофункциональность обеспечивается за счет применения металлорежущих станков с числовым программным управлением (ЧПУ), реализующих трех-, четырех- и пятиосевую обработку резанием, и быстроперестраиваемой технологической оснасткой модульного типа. В основу принципиальных конструктивных схем многофункционального модульного оборудования и оснастки положены кинематические схемы резания, предложенные профессором Г.И. Грановским [11–13], которые в настоящее время интенсивно реализуются и развиваются.

Следует также отметить, что главные этапы развития науки о резании материалов соответствуют этим концепциям и определяются требованиями механизации и автоматизации технологических процессов, масштабами производства, изменением источников энергии, применением наноматериалов, микроэлектроники, нейронных сетей, искусственного интеллекта, информатизацией производства на основе интернет-технологий.

**Основная часть.** Анализ кинематических схем резания свидетельствует о том, что их многообразие (порядка 700 схем) можно свести к некоторой обобщенной (единой) кинематической схеме резания, представленной на рисунке 1. Кинематическая схема резания условно изображается в прямоугольной системе координат, оси которой имеют определенную направленность: ось *OZ* – вдоль вектора линей-

ной скорости  $\bar{v}_e$  движения резания; ось  $OX$  – вдоль оси вращательного движения резания; ось  $OY$  – по радиусу к вращательному движению. Движение резания – результирующее движение режущего инструмента и заготовки в процессе резания. Обрабатываемая заготовка  $Z$  и режущий инструмент  $PI$ , представленные в виде окружных сечений их разнообразных форм, могут совершать поступательные и вращательные элементарные движения резания  $D_1 \dots D_6$  вдоль и вокруг осей  $OX$ ,  $OY$  и  $OZ$ , т.е. иметь согласно базовым положениям теоретической механики шесть степеней свободы (кинематические признаки).

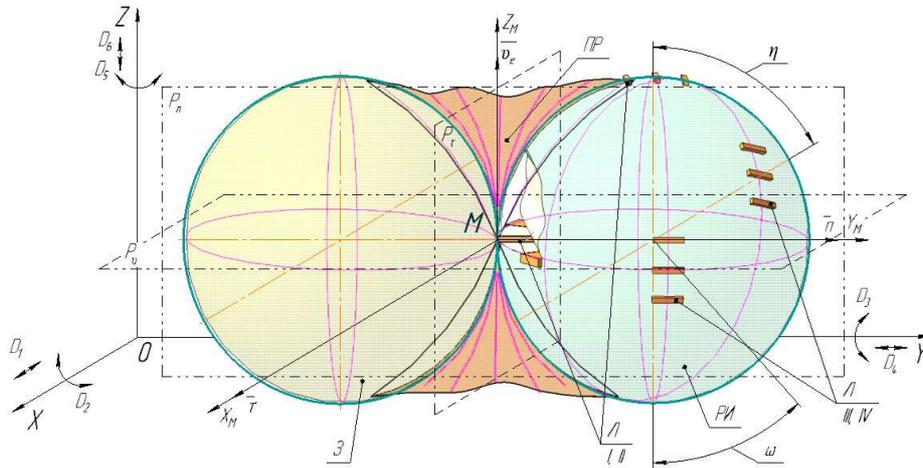


Рисунок 1. – Обобщенная кинематическая схема резания

Лезвия  $L$  инструмента  $PI$  могут находиться на периферии (положения I и II) и торце (положения III и IV) окружных сечений внешней и внутренней поверхностей воображаемой сферы (конструктивные признаки). В точке  $M$  лезвия  $L$  в координатной системе  $x_m, y_m, z_m$  проведены касательный  $\bar{\tau}$ , нормальный  $\bar{n}$  и бинормальный (в данном случае  $\bar{v}$ ) векторы (репер Френе), которые определяют положение отсчетных для геометрических параметров лезвия плоскостей: основной  $P_v - P_v$ , главной секущей  $P_\tau - P_\tau$  и касательной  $P_n - P_n$ . Оси вращения окружных сечений заготовки и инструмента расположены под углами  $\omega$  и  $\eta$  относительно друг друга в двух диаметрально противоположных плоскостях (установочные признаки). Сочетание элементарных движений  $D_1 \dots D_6$  и положений заготовки, инструмента и лезвий в процессе резания обеспечивают формирование поверхности резания по выпуклой, вогнутой и плоской формам.

Обобщенную кинематическую схему резания можно привести к схеме той или иной разновидности обработки резанием путем введения дополнительных условий:

1) принятие любого из элементарных движений резания, направление линейной скорости которого параллельно оси  $OZ$ , является главным движением резания. Главное движение резания – элементарное движение резания, осуществляемое с наибольшей скоростью;

2) исключение из обобщенной кинематической схемы резания тех движений, которые не реализуются в данной разновидности резания;

3) изменение расположения оси неглавного вращательного движения (окружности) путем ее поворота относительно точки  $M$  установки оси этого движения в положение, параллельное той координатной оси, относительно которой задан угол взаимной установки инструмента и заготовки;

4) корректировка направлений элементарных движений резания с учетом конкретной разновидности резания;

5) установление соотношений линейных скоростей элементарных движений резания.

Например, для четырехэлементной кинематической схемы резания (рисунок 2) примем: вращательное движение заготовки  $D_1$  и его линейную скорость  $v_1$  главным движением резания  $D_r$  и  $v_r$  соответственно; вращательное движение инструмента  $D_2$  и его линейную скорость  $v_2$  – касательным движением резания  $D_k$  и  $v_k$  соответственно; поступательные движения инструмента  $D_3$  и  $D_4$  и их линейные скорости  $v_3$  и  $v_4$  – движениями подачи  $D_{s1}$  и  $D_{s2}$  и скоростями подачи  $v_{s1}$  и  $v_{s2}$  соответственно. Тогда результирующая линейная скорость движения резания будет равна

$$v_e = v_1 + v_2 + v_3 + v_4 = v_r + v_k + v_{s1} + v_{s2} = v_r \left( 1 + \frac{v_k}{v_r} + \frac{v_{s1}}{v_r} + \frac{v_{s2}}{v_r} \right) = v_r \cdot (1 + i_k + i_{s1} + i_{s2}).$$

Трансформация четырехэлементной кинематической схемы в более простые, описывающие традиционные виды обработки резанием, проводится при определенных передаточных отношениях  $i_k, i_{s1}, i_{s2}$ , величинах и направлениях линейных скоростей  $v_r, v_k, v_{s1}, v_{s2}$  элементарных движений резания.

Например, при  $i_k = i_{s1} = i_{s2} = 0$  и  $v_r \neq 0$  имеют место строгание, долбление, протягивание; при  $v_r \gg v_s$  и  $i_k = i_s = 0, R_{v_s} = i_k v$  – точение; при  $v_r > v_k > v_s$  и  $i_{s2} = 0$  – ротационное точение или фрезоточение; при  $v_r > v_s$  и  $i_k = i_{s2} = 0, v_{s1}$  оси  $v_r, R_{v_r} = \text{const}$  – осевая обработка; при  $v_r > v_{s1}$  и  $i_k = i_{s2} = 0, v_s \perp$  оси  $v_r, R_{v_r} = \text{const}$  – фрезерование; при  $v_r > v_{s1}, v_k \neq 0, v_{s2} = 0$  – зубофрезерование и т. д.

Здесь  $R_{v_r}$  – радиус траектории главного движения резания.

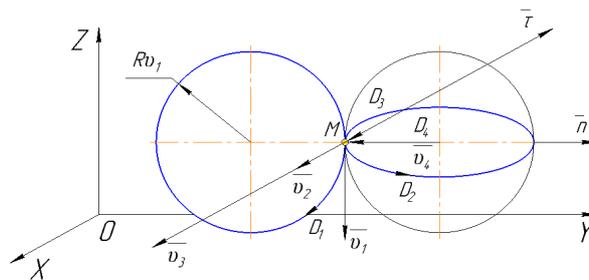


Рисунок 2. – Четырехэлементная кинематическая схема

Реализация двух-, трех- и четырехэлементных кинематических схем резания на современных станках с ЧПУ приводит к таким видам обработки, как винтовая интерполяция, трепанация, трохоидальное и плунжерное резание, и другим. Как правило, в этих видах обработки используется касательное движение или врезание по касательной режущих лезвий. Согласно [12], касательное движение – это прямолинейное поступательное или вращательное движение режущего инструмента, скорость которого меньше скорости главного движения резания и направлена по касательной к режущей кромке, предназначенное для того, чтобы сменить контактирующие с заготовкой участки режущей кромки.

Профессор В.Ф. Бобров [15] трактует это понятие несколько шире и рассматривает точение резцом, режущая кромка которого есть касательная к обработанной поверхности или перемещается вдоль самой себя. Доказано [16; 17], что касательное движение режущей кромки снижает силы трения, температуру и мощность резания. Принято принципиальное положение теории резания [18; 19], согласно которому каждой паре обрабатываемого и инструментального материалов соответствует оптимальная скорость резания, обеспечивающая минимальное значение температуры резания. Именно эти преимущества касательного движения и принципиальное положение теории резания обуславливают развитие трех-, четырех- и пятиосевой обработки сложных поверхностей деталей на станках с ЧПУ.

Для описания траекторий и поверхностей резания предложен универсальный принцип продольного сложнофункционального формирования [8], который предусматривает образование поверхности,

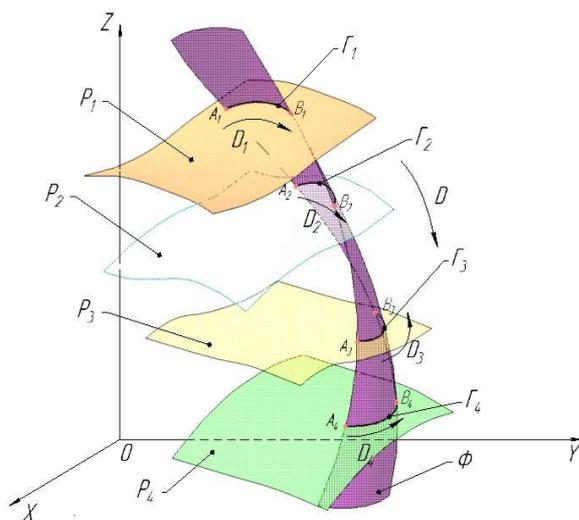


Рисунок 3. – Общая схема формирования поверхности

как показано на рисунке 3, кривой линией  $\Gamma$ , расположенной на некоторой поверхности  $P$  и перемещающейся по ней путем движения  $D$  (в сечениях  $D_1 \dots D_4$ ) этой поверхности в пространстве с функциональным изменением ее формы (в сечениях  $P_1 \dots P_4$ ) и формы кривой линии (в сечениях  $\Gamma_1 \dots \Gamma_4$ ).

Образуемая при этом поверхность называется формируемой поверхностью  $\Phi$ . Кривая, осуществляющая при своем пространственном движении формирование поверхности, называется формирующей линией, а поверхность, на которой она расположена, – формирующей поверхностью.

Пространственное перемещение формирующей линии – формирующее движение; траектория рассматриваемой точки формирующей линии в формирующем движении – след формирования.

Общий случай формирования поверхности представляет собой сложный процесс, определяемый множеством различных характеристик, которые разделяются на две группы: 1) характеристики формы; 2) характеристики движения.

Указанные выше характеристики определяют:

- степень сложности формирующей поверхности и формирующей линии;
- степень изменяемости формы формирующей поверхности и формы формирующей линии;
- степень свободы формирующей поверхности в пространстве и формирующей линии на формирующей поверхности.

Для многоосевой обработки на станках с ЧПУ в большинстве случаев можно выделить четыре возможных варианта её реализации:

1) *характер перемещения* формирующей плоскости с параметром  $P_p$  (плоскость в любом случае смещается – иначе не было бы поверхности) при двух заданных вариантах перемещения:

- однокоординатное (по оси  $Z$ ) ортогональное (перпендикулярное плоскости) перемещение –  $P_p = 0$ ;
- вращательное перемещение плоскости (вокруг оси  $X$ , расположенной в самой плоскости) –  $P_p = 1$ .

2) *степень подвижности* формирующей линии в формирующей плоскости с параметром  $P_1$ :

- формирующая линия неподвижна –  $P_1 = 0$ ;
- формирующая линия имеет перемещение в формирующей плоскости –  $P_1 = 1$ ;

3) *степень изменяемости* формирующей линии в формирующей плоскости с параметром  $I_1$ :

- формирующая линия неизменна  $I_1 = 0$ ;
- формирующая линия изменяется  $I_1 = 1$ ;

4) *степень сложности* формирующей линии с параметрами  $F_1$ :

- формирующая линия  $F_1$  прямолинейна;
- формирующая линия  $F_1$  криволинейна.

Получено математическое выражение\*, описывающее формирование линейчатой поверхности прямой линией во вращающейся плоскости, имеющее по координате  $z$  следующий вид:

$$z = \frac{k + tg \left[ n_\phi \cdot \phi \cdot P_p + n_z \cdot z \cdot (1 - P_p) \right]}{1 - k \cdot tg \left[ n_\phi \cdot \phi \cdot P_p + n_z \cdot z \cdot (1 - P_p) \right]} \cdot \left[ x + C_\phi \cdot \phi \cdot P_p + C_z \cdot z \cdot (1 - P_p) \right] \pm \pm \frac{b}{\sqrt{1 - k^2}} \cdot \sqrt{1 + \frac{k + tg \left[ n_\phi \cdot \phi \cdot P_p + n_z \cdot z \cdot (1 - P_p) \right]}{1 - k \cdot tg \left[ n_\phi \cdot \phi \cdot P_p + n_z \cdot z \cdot (1 - P_p) \right]}} + P_p \cdot (m_\phi - k \cdot C_\phi) \cdot \phi + (1 - P_p) \cdot (m_z - k \cdot C_z) \cdot z \cdot \sin(P_p \cdot \phi). \quad (1)$$

Съем припуска с заготовки определяется возможными сочетаниями параметров режущей кромки  $K$  и траектории  $T$  резания в способах копирования  $K$ , огибания  $O$  и пересечения  $П$ . Режущая кромка и траектория резания являются уровнями варьирования, а копирование, огибание и пересечение – факторами обработки. Исходя из этого, например, при обработке цилиндрической поверхности детали возможно 12 способов ее формирования и срезания припуска (таблица 1).

Таблица 1. – Способы обработки цилиндрической поверхности детали

№ способа	Образование линии формы	Образование изменения формы	Образование способа
1	Копированием (РКК)	Копированием (ТК)	РКК – ТК
2	Огибанием (РКО)	Копированием (ТК)	РКО – ТК
3	Пересечением (РКП)	Копированием (ТК)	РКП – ТК
4	Копированием (РКК)	Огибанием (ТО)	РКК – ТО
5	Огибанием (РКО)	Огибанием (ТО)	РКО – ТО
6	Пересечением (РКП)	Огибанием (ТО)	РКП – ТО
7	Копированием (ТК)	Копированием (РКК)	ТК – РКК
8	Копированием (ТК)	Огибанием (РКО)	ТК – РКО
9	Копированием (ТК)	Пересечением (РКП)	ТК – РКП
10	Огибанием (ТО)	Копированием (РКК)	ТО – РКК
11	Огибанием (ТО)	Огибанием (РКО)	ТО – РКО
12	Огибанием (ТО)	Пересечением (РКП)	ТО – РКП

Для трехэлементной кинематической схемы резания с двумя вращательными и одним поступательными движениями съем припуска с заготовки определяется следующим передаточным отношением:

$$i = \frac{m}{z_n} \cdot \frac{d}{D}. \quad (2)$$

\* Экспликация формул здесь и далее приведена в таблице 2.

Таблица 2. – Экспликация используемых формул

Условные обозначения	Наименование параметров
$D_1 \dots D_6$	поступательные и вращательные элементарные движения резания;
$\bar{v}_1 \dots \bar{v}_6$	векторы линейной скорости элементарного движения резания;
$\bar{v}_e$	вектор скорости движения резания;
$\bar{\tau}$	касательный вектор;
$\bar{n}$	нормальный вектор;
$Rv_r$	радиус траектории главного движения резания;
$P_P$	параметр формообразующей плоскости;
$I_1$	параметр изменяемости формирующей линии;
$F_1$	параметр сложности формирующей линии;
$\Phi$	угловая координата плоскости $P$ ;
$X, Z$	линейные координаты плоскости $P$ ;
$b, k$	коэффициенты линейного и углового перемещений соответствующей координаты;
$n_\phi, n_z, m_p, m_z,$	поправочные коэффициенты на скорость перемещения плоскости $P$
$C_p, C_z, C_\phi$	по соответствующей координате;
$i_k, i_{s1}$ и $i_{s2}$	передаточные отношения (кинематические коэффициенты) между главным движением, касательным движением и движением подачи соответственно;
$\omega, \eta$	углы установки осей режущего инструмента и заготовки относительно друг друга;
$Z_l$	число лезвий режущего инструмента;
$Z_1$	целое число угловых шагов режущих лезвий инструмента;
$a_\mu$	толщина срезаемого слоя в точке $M$ ;
$S_o$	подача на оборот;
$\mu$	угол контакта;
$\gamma_r$	передний угол режущего лезвия инструмента;
$\gamma_k, \alpha_k, \lambda_k$	кинематические углы соответственно передний, задний и наклона режущей кромки;
$d, D$	диаметры соответственно режущего инструмента и заготовки;
$\bar{n}_n, \bar{n}_z$	нормальный вектор соответственно со стороны передней и задней поверхностей лезвия;
$\bar{\tau}_k$	касательный вектор к режущей кромке лезвия;
$l$	коэффициент, представляющий собой значение длины контакта при $\mu = 90^\circ$ ;
$C, K$	поправочные коэффициенты с соответствующими индексами;
$t$	глубина резания;
$v_s, v_k$ и $v_r$	соответственно скорости подачи, касательного и главного движений резания;
$x, y, z$	дробные показатели степени с соответствующими индексами;
$m$	кинематическая характеристика схемы резания;
$S_o$	величина подачи инструмента за один оборот заготовки;
$\theta$	угловое положение точки на режущей кромке;
$\frac{v_{ex_1}}{v_{ez_1}}$ и $\frac{v_{ey_1}}{v_{ez_1}}$	соотношения проекций скорости резания на соответствующие оси координат;
$r, z, t$	координаты и время в точке тела;
$r_u, \mu_u, z_u$	координаты источника теплоты;
$t_r$	текущее время;
$t_u$	время действия источника теплоты;
$q$	интенсивность источника теплоты;
$\lambda$	коэффициент теплопроводности материала;
$I_o(ar)$	функция Бесселя;
$\sum$	суммирование по положительным корням характеристического уравнения $\alpha I_n(\alpha r) = 0$

Толщина срезаемого слоя для трехэлементной кинематической схемы резания может быть определена по формуле из [3]:

$$a_\mu = S_o \cdot \mu \cdot \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{v_k}{v}\right)^2 + 1}} \cdot m, \quad (3)$$

а для четырехэлементной кинематической схемы резания – по следующей формуле:

$$a_{\mu} = S_o \cdot \mu \cdot \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{v_{\kappa}}{v}\right)^2 + 1}} \cdot m \pm \frac{d}{2} \cdot (\sin \mu + 1). \quad (4)$$

Кинематические углы режущего лезвия инструмента определяются между передней и задней поверхностями режущей кромки и векторами – нормальным, касательным и скорости резания (см. рисунок 1).

Передний угол:

$$\operatorname{tg} \gamma_{\kappa} = \frac{(\overline{v_e} \cdot \overline{n_n} \cdot \overline{\tau_e}) \cdot |\overline{v_e}|}{(\overline{v_e}) \cdot \overline{n_n} \cdot \left| \left[ \overline{\tau_{\kappa}} \cdot \overline{v_e} \right] \right|}. \quad (5)$$

Задний угол:

$$\operatorname{tg} \alpha_{\kappa} = \frac{(\overline{v_e} \cdot \overline{n_s}) \cdot \left| \left[ \overline{\tau_{\kappa}} \cdot \overline{v_e} \right] \right|}{(\overline{v_e} \cdot \overline{n_s} \cdot \overline{\tau_{\kappa}}) \cdot |\overline{v_e}|}. \quad (6)$$

Угол наклона режущей кромки:

$$\operatorname{tg} \lambda_{\kappa} = \frac{(\overline{v_e} \cdot \overline{\tau_{\kappa}})}{\left| \left[ \overline{\tau_{\kappa}} \cdot \overline{v_e} \right] \right|}. \quad (7)$$

Для подвижной системы координат  $X Y Z$  (см. рисунок 1) векторы  $\overline{v_e}$ ,  $\overline{n_n}$ ,  $\overline{n_s}$  и  $\overline{\tau_{\kappa}}$  выражены через их проекции на соответствующие координатные оси и получены формулы, например, для расчета кинематического переднего угла режущего лезвия инструмента в виде

$$\operatorname{tg} \gamma = \frac{\operatorname{tg} \gamma_r - \frac{v_{ex_1}}{v_{ez_1}} \sin \theta + \frac{v_{ey_1}}{v_{ez_1}} \cos \theta}{1 + \operatorname{tg} \gamma_r \left( \frac{v_{ex_1}}{v_{ez_1}} \sin \theta - \frac{v_{ey_1}}{v_{ez_1}} \cos \theta \right)} \cdot \sqrt{\frac{1 + \left( \frac{v_{ex_1}}{v_{ez_1}} \right)^2 + \left( \frac{v_{ey_1}}{v_{ez_1}} \right)^2}{1 + \left( \frac{v_{ex_1}}{v_{ez_1}} \sin \theta - \frac{v_{ey_1}}{v_{ez_1}} \cos \theta \right)^2}}. \quad (8)$$

Для расчета температуры в инструменте и детали с источником теплоты в виде криволинейного треугольника, действующего в течение определенного времени, получена следующая формула:

$$i\theta(r, z, t) = \frac{2q}{R^2 \cdot \lambda \cdot \sqrt{\pi k}} \cdot \left\{ l \cdot \sin^{\mu} \mu (2R - l \cdot \sin^{\mu} \mu) \cdot \left[ 2\sqrt{t} \exp\left(-\frac{z^2}{4kt}\right) - \frac{z\sqrt{\pi}}{\sqrt{k}} \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{z}{2\sqrt{kt}}\right) \right] + \frac{\sqrt{\pi}}{\sqrt{k}} \times \right. \\ \left. \times \sum_{\substack{\alpha \\ \alpha \neq 0}} \frac{\exp(-\alpha r) \cdot I_0(\alpha r)}{\alpha \cdot I_0^2(\alpha R)} \int_{R \cdot l \sin^{\mu} \mu}^R r_u I_0(\alpha r_u) \cdot \int_0^{\alpha \sqrt{kt}} \exp\left[-\left(\frac{z\alpha}{2x} - x\right)^2\right] dx \right\}. \quad (9)$$

Физические характеристики процесса резания также определяются экспериментальным путем с использованием специальных стэндов, смонтированных на базе универсальных металлорежущих станков и станков с ЧПУ. Использование универсальных устройств, регистрирующей аппаратуры, системы ЧПУ, соединенной с ЭВМ, обеспечивает одновременную фиксацию и управление в полуавтоматическом или автоматическом режимах в процессе резания скоростями движений инструмента и заготовки, геометрией их контактных поверхностей, параметрами стружкообразования, сил и температуры резания, износа лезвий и состояния поверхностей детали.

Стэнд может использоваться для физического моделирования и диагностики других процессов контактного взаимодействия тел, например, различных видов трения деталей машин.

На рисунке 4 представлен экспериментальный стэнд на базе универсально-заточного станка 1 модели 3М642 с приспособлением для наружного круглого шлифования 2. Элементы схемы смонтиро-

ваны на передней панели несущей конструкции и включают программируемый логический контроллер 3, частотные преобразователи 4, операторскую панель 5 и энкодер 6.



Рисунок 4. – Стенд на базе универсально-заточного станка модели 3М642

В результате проведенных экспериментальных исследований процесса резания на вышеприведенных стендах получены следующие зависимости:

- длины контакта передней поверхности инструмента со стружкой

$$l_n = l \cdot \sin^{\lambda_e} \mu;$$

$$l = \frac{C_1 \cdot S^{y_1}}{\left(\frac{v_k}{v_f}\right)^{z_1}};$$

- коэффициента усадки стружки

$$K_a = c_k \cdot t^{x_k} \cdot v_s^{y_k} \cdot v^{z_k} \cdot \left(\frac{v_k}{v}\right)^{m_k} \cdot K_k;$$

- силы резания

$$P = C_p \cdot t^{x_p} \cdot v_s^{y_p} \cdot v^{z_p} \cdot \left(\frac{v_k}{v}\right)^{m_p} \cdot K_p;$$

- температуры резания

$$\theta = C_\theta \cdot t^{x_\theta} \cdot v_s^{y_\theta} \cdot v^{z_\theta} \cdot \left(\frac{v_k}{v}\right)^{m_\theta} \cdot K_\theta;$$

- стойкости инструмента

$$T = \frac{C_T \cdot K_T}{t^{x_T} \cdot v_s^{y_T} \cdot v^{z_T} \cdot \left(\frac{v_k}{v}\right)^{m_T}};$$

- качества обработанной поверхности детали

$$R_z = \frac{C_{R_z} \cdot t^{x_{R_z}} \cdot v_k^{y_{R_z}} \cdot K_{R_z}}{v^{z_{R_z}} \cdot \left(\frac{v_k}{v}\right)^{m_{R_z}}}.$$

Приведенные математические модели, описывающие кинематические и геометрические параметры, физические и технологические характеристики процесса резания, взаимосвязаны между собой и образуют систему резания, которую необходимо рассматривать во взаимосвязи с технологической и производственными системами [21].

Общая структура технологической системы  $ТС$ , включающая систему резания  $СР$ , представлена в виде схемы на рисунке 5. На входе этой системы находятся заготовка, инструмент, станок, приспособление и технологическая среда с собственными параметрами, объединенные кинематической схемой резания (видом

обработки резанием) и режимом резания (скорость, подача, глубина резания), которые являются своеобразным и наиболее «гибким» регулятором процесса резания. Процесс резания определяется различными параметрами: деформационными, динамическими, тепловыми, электромагнитными и их характеристиками.

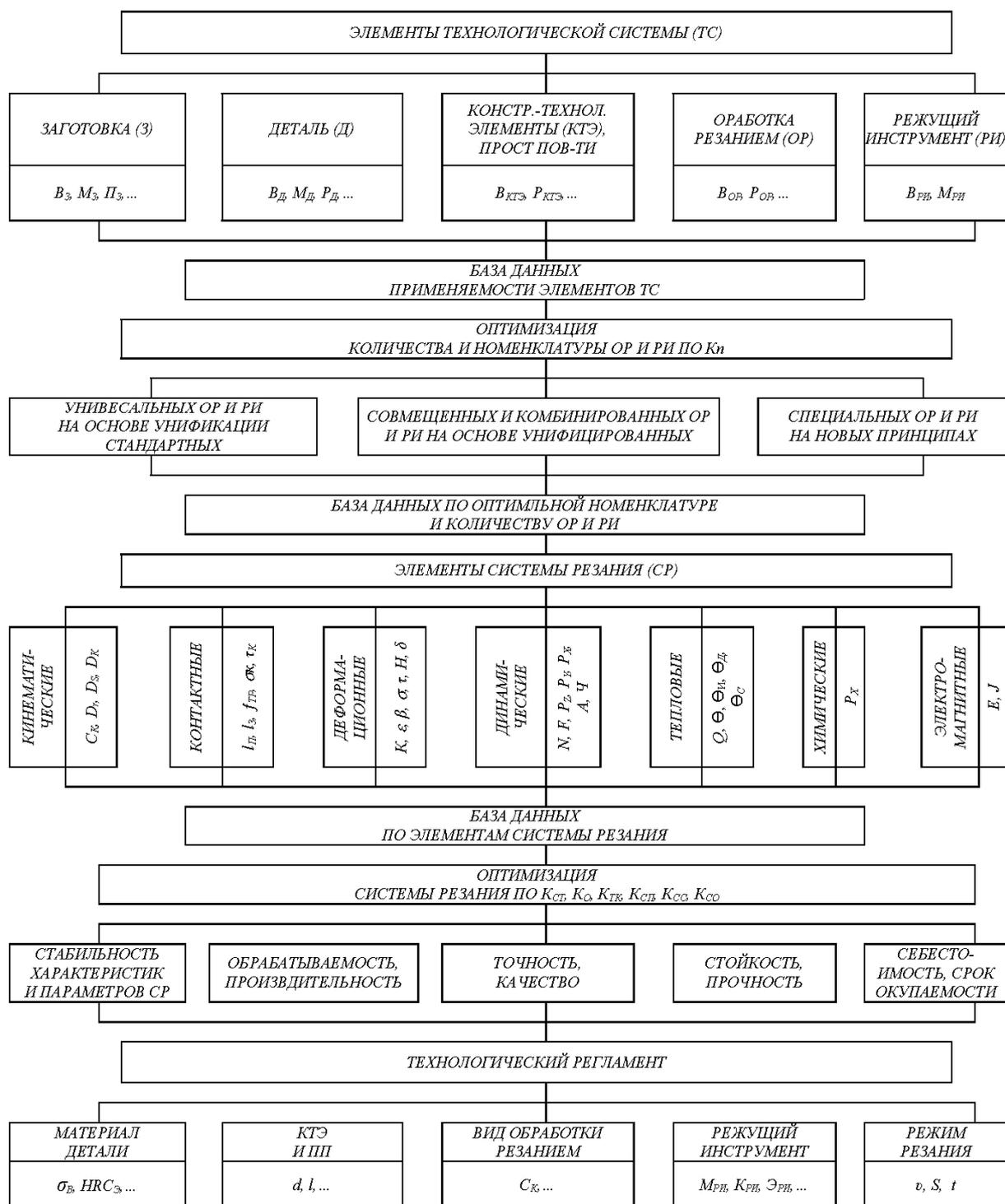


Рисунок 5. – Структура технологической системы

На выходе системы резания желательно получить наилучшие показатели, характеризующие цели обработки – производительность, качество и себестоимость. По каждому компоненту и показателю системы резания может быть сформирована база данных, введены критерии получения наилучших (оптимальных) значений показателей, т.е. создана система автоматизированного проектирования процесса резания, металлорежущих станков и режущих инструментов [20].

По входным компонентам технологической системы: заготовке, детали и ее конструктивным элементам, а также поверхностным компонентам: виду обработки, режущему инструменту и т.д. – формируются базы данных с учетом характеризующих их параметров, таких как: вид (*B*); материал (*M*); припуск (*L*); размер (*P*) и т.п. Базы данных оптимизируются по критерию применимости номенклатуры изделий. Далее рассматриваются элементы системы резания *CP* и формируются их базы данных, которые оптимизируются по различным критериям, а именно стойкости, обрабатываемости и т.д. В конечном итоге формируется технологический регламент, учитывающий свойства обрабатываемого материала, форму и параметры конструктивных элементов и поверхностей детали, характеристики вида обработки резанием и тип режущего инструмента, а также режим резания. Из технологических регламентов складывается весь технологический процесс механической обработки поверхностей детали. Этот процесс должен быть дополнен технологией сборки изделий, должен учитывать условия эксплуатации и утилизации изделий, т.е. весь жизненный цикл изделия.

Таким образом, полученные математические и физические модели процесса резания в виде обобщающих теоретических и эмпирических зависимостей выходных характеристик и показателей от входных параметров обработки, а также разработанные исследовательские стенды и технологическая система позволяют создавать единую управляющую платформу процесса резания, открытые системы ЧПУ станков со встроенными модулями нейропроцессоров и модулями связи с интернетом.

В настоящее время такие системы функционируют (например, CAD-системы) и используются при разработке управляющих программ станков с ЧПУ, т.е. адаптированы с САМ-системами. Решается задача введения в действующие системы ЧПУ самообучающихся функциональных (электронных) блоков, которые позволяли бы системе самой выбирать (без участия оператора) наилучшие варианты обработки при изменении их условий. Данные функциональные блоки могут быть построены на нейронных сетях (искусственный интеллект) и связаны с интернетом (цифровые технологии) [23–25].

Таким образом, при разработке методологии исследования процесса резания материалов необходимо учитывать следующие факторы:

1) общие тенденции циклического развития экономики – технологические уклады; наличие в стране одновременно нескольких технологических укладов; необходимость устойчивого развития – баланса природы и цивилизации, инноваций и восприимчивости к ним экономики;

2) концепции обобщения достижений науки в различных сферах деятельности (естествознании и философии), связь науки, образования («университет 1,0» – «университет 4,0») и промышленности («индустрия 1,0» – «индустрия 4,0»); развитие объединяющих (природоподобных) технологий – НБИК (нано, био-, инфо-, а также когнитивных технологий);

3) результаты глубоких исследований строения материи и физико-химических процессов – частицы Хигса, наличие трех и более осей симметрии в кристаллах и других достижений;

4) индивидуализацию мелкосерийного многономенклатурного производства изделий на основе интернет-технологий, облачных технологий, искусственного интеллекта, нейронных сетей и т.п.; переход от типовых и групповых технологий к гибким модульным и мобильным технологиям; развитие трех-, четырех- и пятимерных технологий, аддитивных и гибридных технологий, автоматизации и роботизации производства;

5) повышение требований к качеству изделий, обеспечение точности деталей на наноуровне; развитие новых материалов деталей и инструментов, в том числе покрытий;

6) систематизацию обработки резанием; создание обобщенных кинематических схем резания; универсальные принципы формообразования поверхностей; моделирование явлений процесса резания; разработку многофункциональных станков и технологической оснастки, обеспечивающих на одном рабочем месте обработку различных конструктивных элементов и поверхностей деталей с наивысшей производительностью и точностью;

7) развитие высокоскоростной обработки материалов лезвийным режущим инструментом, изменение физических и химических явлений процесса высокоскоростного резания по сравнению с традиционным;

8) оптимизацию и управление функционированием технологической системы по комплексному критерию (производительность, качество и себестоимость).

## ЛИТЕРАТУРА

1. Технологический уклад [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki/>.
2. Глазьев, С.Ю. Эволюция технико-экономических систем: возможности и границы централизованного регулирования / С.Ю. Глазьев, Д.С. Львов, Г.Г. Фетисов. – М. : Наука, 1992. – 207 с.
3. Перес, К. Технологические революции и финансовый капитал : динамика пузырей и периодов процветания / К. Перес. – М. : Дело, 2011. – 232 с.
4. Третья волна (Тоффлер) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki/>.
5. Патрик де Вос. Информация как суть четвертой промышленной революции / де Вос Патрик // Станочный парк. – 2017. – С. 29–31.

6. Конвергенция [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki/>.
7. Устойчивое развитие [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki/>.
8. Попок, Н.Н. Мобильная реорганизация машиностроительного производства / Н.Н. Попок. – Минск : Технопринт, 2001. – 396 с.
9. Конструирование и оснащение технологических комплексов / А.М. Русецкий [и др.] ; под общ. ред. А.М. Русецкого. – Минск : Беларус. навука, 2014. – 316 с.
10. Грановский, Г.И. Кинематика резания / Г.И. Грановский. – М. : Машгиз, 1948. – 199 с.
11. Виды обработки резанием. Термины и определения общих понятий : ГОСТ 25761-83.
12. Обработка резанием. Термины, определения и обозначения общих понятий : ГОСТ 25762-83.
13. Инструменты режущие. Термины и определения общих понятий : ГОСТ 25751-83.
14. Попок, Н.Н. Анализ особенностей кинематики и геометрии процесса высокоскоростного резания / Н.Н. Попок, Р.С. Хмельницкий, М.В. Черневич // Технология – оборудование – инструмент – качество : материалы междунар. науч.-техн. конф. – Минск : Бизнес-офсет, 2014. – С. 93–95.
15. Бобров, В.Ф. Влияние угла наклона главной режущей кромки инструмента на процесс резания металлов / В.Ф. Бобров. – М. : Машгиз, 1962. – 152 с.
16. Бобров, В.Ф. Резание металлов самовращающимися резцами / В.Ф. Бобров, Д.Е. Иерусалимский. – М. : Машиностроение, 1972. – 111 с.
17. Попок, Н.Н. Исследование процесса ротационного резания принудительно вращающимися инструментами : дис. ... канд. техн. наук / Н.Н. Попок. – Минск, 1983. – 274 с.
18. Рейхель, В. Методика определения стойкости резца и обрабатываемости материала / В. Рейхель // Мирская техника. – 1936. – № 4. – С. 6–14.
19. Макаров, А.Д. Оптимизация процессов резания / А.Д. Макаров. – М. : Машиностроение, 1976. – 278 с.
20. Хмельницкий, Р.С. Автоматизация станочного оборудования для высокоскоростной обработки резанием / Р.С. Хмельницкий, В.С. Анисимов, Г.И. Гвоздь // Инновационные технологии, автоматизация и мехатроника в машино- и приборостроении : материалы VI междунар. науч.-практ. конф. ; ред. кол.: А.М. Малярович (гл. ред.) [и др.]. – Минск : Бизнес-офсет, 2018. – С. 111–112.
21. Новоселов, Ю.А. Методологические основы и пути разработки САПР ротационного резания / Ю.А. Новоселов, Н.Н. Попок // Изв. вузов. Машиностроение. – М. : Изд. МВТУ им. Н.Э. Баумана, 1987. – № 5. – С. 125–128.
22. Попок, Н.Н. Теоретические и технологические основы мобильного многономенклатурного производства с интенсификацией механической обработки поверхностей деталей типа тел вращения : дис. ... д-ра техн. наук / Н.Н. Попок. – Минск, 2002. – 341 с.
23. Пашкевич, В.М. Повышение точности механической обработки и сборки изделий машиностроительного производства на основе построения и использования компьютерных обучающих систем : автореф. дис. ... д-ра техн. наук / В.М. Пашкевич. – Минск, 2007. – 46 с.
24. Гулаков, К.В. Моделирование многомерных объектов на основе когнитивных карт с нейросетевой идентификацией параметров : автореф. дис. ... канд. техн. наук / К.В. Гулаков. – Брянск, 2013. – 19 с.
25. Кабалдин, Ю.Г. Управление технологическим оборудованием предприятия в условиях цифровых производств на основе искусственного интеллекта и облачных технологий / Ю.Г. Кабалдин, Д.А. Шатагин, А.М. Кузьмишина // МА и ППСИМ. – Н. Новгород, 2018. – № 1. – С. 15–26.

Поступила 14.02.2019

## METHODOLOGY OF RESEARCH OF PROCESS OF CUTTING OF MATERIALS IN MODERN CONDITIONS OF DEVELOPMENT OF MECHANICAL ENGINEERING

N. POPOK

*The modern trends and concepts of the development of mechanical engineering are analyzed. The methodological principles of conducting theoretical and experimental studies of the cutting process, a generalized kinematic scheme of cutting and a diagram of the formation of surfaces, the dependences of the kinematic and physical characteristics of the cutting process on the processing conditions, confirming their relationship, are given. Universal stands and equipment for the study of cutting processing as applied to machine tools are described, with numerical control, the general structure of the technological system is given. The creation of a unified control platform for the cutting process and self-learning systems is justified.*

**Keywords:** methodology, mechanical engineering, cutting process, kinematics, physical characteristics, machine tool numerically controlled, self-learning system.

УДК 629.7.07

## ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТЬ ЭКСПЛУАТАЦИИ ОБЪЕКТОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

*канд. техн. наук, доц. В.В. КУТУЗОВ*  
(Белорусско-Российский университет, Могилев);  
*канд. техн. наук, доц. Б.М. МОРГАЛИК; Е.А. КОЛЮКОВИЧ*  
(Могилевский государственный университет продовольствия)

*На примере фронтального погрузчика рассматриваются и анализируются изменения технико-экономических показателей машины на этапе эксплуатации ее жизненного цикла. Основным инструментом проведения исследований являются результаты технико-экономического моделирования, позволяющие в сокращенные сроки спрогнозировать состояние объекта и определить его технико-экономические показатели, которые являются критерием целесообразности дальнейшего использования объекта для решения практических и производственных задач.*

**Ключевые слова:** *технико-экономическое моделирование, эксплуатация, погрузчик, производительность, прибыль.*

**Введение.** Техничко-экономическое моделирование применительно к исследованиям различных этапов жизненного цикла технических объектов приобрело большое значение в связи с широкими возможностями цифровых технологий, которые позволяют получать смоделированное количественное, качественное, в том числе и визуализированное представление о результатах исследований, которые связаны с поведением технического объекта на любом этапе жизненного цикла, в различных режимах его функционирования [1; 2]. Итогом технико-экономического моделирования является повышение результативности решений в сфере качества эксплуатации технических объектов и степени экономической целесообразности применения объекта при решении реальных производственных задач.

Техничко-экономическое моделирование, используемое для анализа экономических показателей наблюдаемого объекта, позволяет оценить перспективную рентабельность его функционирования на том или ином производственном объекте [2], а в случае анализа технических параметров в процессе функционирования – и необходимость его технического обслуживания, которая во многом определяется значениями параметров состояния сборочных единиц, значениями параметров износа рабочего оборудования, систем технического объекта и наработкой на отказ в целом. Следует также отметить, что нередко предприятия, приобретая новую технику, руководствуются ограниченной информацией о ее качестве, надежности, ремонтпригодности и в целом экономической обоснованности ее использования на тех или иных работах, что влечет за собой вероятность принятия неконкурентоспособных решений. В данном случае, чтобы исключить вероятность принятия подобных решений, необходимо использовать отмеченное выше технико-экономическое моделирование, которое позволяет оценить возможность возврата инвестиций при приобретении того или иного технического объекта и использовании его на производстве.

**Целесообразность эксплуатации объектов с применением технико-экономического моделирования.** Рассматривая вопрос надежности технического обслуживания и восстановления работоспособности технических объектов в контексте технико-экономического моделирования, необходимо отметить, что показатели надежности и закладываемого ресурса конструктивных элементов технических объектов следует учитывать ещё на стадии проектирования. На основании сказанного, а также принимая во внимание утверждение В.В. Медведева [3], можно сделать вывод, что изменение вероятности безотказной работы любого конструктивного элемента обуславливает пропорциональное изменение вероятности безотказной работы технического объекта в целом, а наибольшее значение вероятности безотказной работы конструктивного элемента достигается при минимуме суммарных затрат на приобретение технического объекта и его дальнейшую эксплуатацию в течение нормативного срока службы.

Таким образом, *технико-экономическое моделирование* позволяет учесть все затраты на технику уже на стадии проектирования с учетом показателей надежности и предусматривает полное и точное определение всех затрат, поскольку они определяют выбор того или иного варианта конструктивного решения.

Учет показателей надежности конструктивных элементов совместно с технико-экономической моделью технического объекта при сравнительно невысоких затратах на программные и аппаратные ресурсы позволит [4–6]: спрогнозировать целесообразность использования объекта в реальных условиях; установить полезный срок службы; назначить своевременные периодичности проведения мероприятий по поддержанию и восстановлению работоспособности объектов; рассчитать наработки окупаемости, прибыльной и убыточной эксплуатации, сроки амортизации объекта, а также экономически обоснованные сроки списания объекта. Для решения подобных задач широко применяются методы, основанные на обеспечении минимальных приведенных затрат.

В рассматриваемом варианте в качестве основы заложено получение максимальной прибыли от эксплуатации машины с обеспечением высоких значений эксплуатационной производительности и максимально возможного, экономически целесообразного срока эксплуатации машины. Для понимания целесообразности использования инструментов технико-экономического моделирования необходимо рассмотреть пример, который позволит поставить актуальные задачи моделирования, обозначить пути их решения и оценить целесообразность применения инструментов в конкретной области.

Важность рассмотрения объекта в разрезе всего жизненного цикла оговаривается и в стандартах менеджмента качества ISO серии 9000. Этапы жизненного цикла объекта согласно ISO 9000 после его изготовления представлены на рисунке 1.

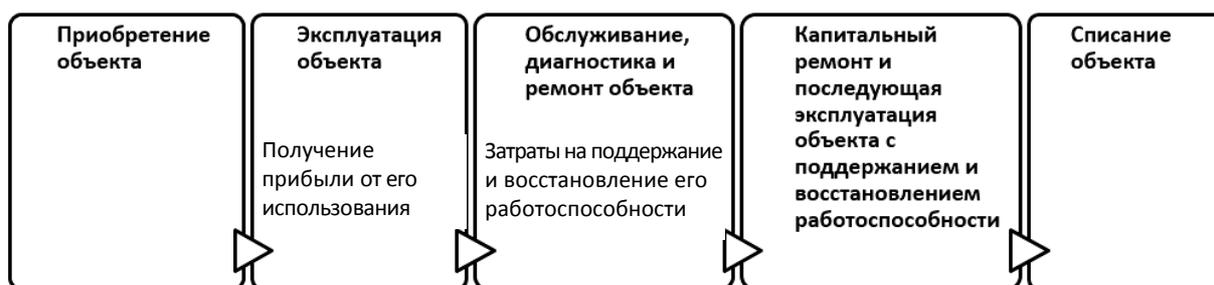


Рисунок 1. – Этапы жизненного цикла объекта после его изготовления

В качестве примера рассмотрим эксплуатацию фронтального погрузчика грузоподъемностью три тонны. Ресурс погрузчика, согласно руководству по эксплуатации [7], составляет 6000 моточасов с периодичностью проведения ремонтов, ТО-2 и ТО-1, равных соответственно 1000, 250 и 50 моточасов.

Значение технической производительности для нового погрузчика составляет 121 м<sup>3</sup>/ч при погрузке грунтов 1...3-й категории в самосвал. С увеличением наработки с начала эксплуатации при выполнении аналогичных операций производительность снижается вплоть до 70 м<sup>3</sup>/ч (рисунок 2).



Рисунок 2. – Зависимость изменения технической производительности погрузчика от наработки с начала эксплуатации

На снижение производительности существенное влияние оказывает увеличение времени цикла рабочих операций машины, техническое состояние ее сборочных единиц. Так, для исследуемого погрузчика время цикла увеличилось с 52 до 66 секунд в зависимости от наработки с начала эксплуатации из-за снижения КПД элементов гидропривода.

Изменение производительности отражается на уменьшении объемов выполняемых работ и прибыли от них получаемой. В результате запланированные объемы работ превышаются на 75% по сравнению с теми, которые может выполнить машина (рисунок 3). Изменение технического состояния машины влияет на изменение себестоимости машиночаса (рисунок 4). Происходит увеличение затрат на топливо и смазочные материалы, техническое обслуживание и технические ремонты, составляющих основу всех эксплуатационных затрат, что в конечном итоге увеличивает стоимость выполняемых работ погрузчиком и снижает получаемую прибыль от его работы для предприятия. Проведение мероприятий, связанных с поддержанием и восстановлением работоспособности машины (техническое обслуживание, ремонты, диагностирование), позволяет замедлить ухудшение технического состояния и снижение производи-

ности машины и других показателей ее работы. Предварительное моделирование изменения технического состояния машины и изменения ее технико-экономических показателей дает возможность организации планировать и организовывать свои трудовые, материальные и временные ресурсы наиболее эффективно. В реальной эксплуатации объект способен работать в различных условиях с выполнением различных технологических операций и объемов работ. Практически оценку эффективности его использования целесообразно проводить поэтапным моделированием с определением суммарной прибыли за установленные интервалы наработки. Основным принципом, подлежащим реализации в рассматриваемой исследовательской задаче, является использование совокупности различных видов моделирования, к числу которых необходимо отнести аналитико-имитационное моделирование, математическое и стохастическое.

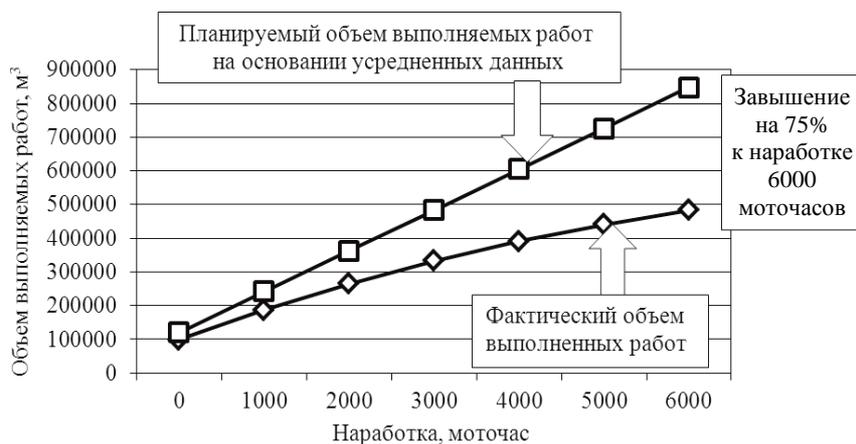


Рисунок 3. – Изменение плановых и фактических объемов работ в зависимости от наработки с начала эксплуатации



Рисунок 4. – Распределение эксплуатационных затрат себестоимости машиночаса по погрузчику в процентном отношении

Аналитико-имитационное моделирование предполагает замену изучаемого объекта имитирующим объектом (моделью), что, в свою очередь, предполагает использование совокупности математических моделей, которые с определенной степенью точности могут формализовать объект исследования. Математические модели в данном случае выступают в роли «несущих» или основных, которые характеризуют объект в целом, его основные параметры и процессы. Изменение производительности машины, себестоимости машино-часа и других технико-экономических показателей учитывалось при моделировании работы взятого в качестве примера фронтального погрузчика (рисунок 5). Результаты моделирования выделили четыре ярко выраженных этапа работы машины: *первый этап* – окупаемость затрат на приобретение машины (затраты на ТО фиксированы; на ремонты – отсутствуют; прибыль от работы растет); *второй этап* – прибыльная работа, с ростом прибыли все затраты на эксплуатацию машины меньше получаемой прибыли от её работы; *третий этап* – прибыльная работа (со спадом прибыли все затраты

на эксплуатацию машины начинают увеличиваться); *четвертый* – работа в убыток (затраты на поддержание и восстановление начинают значительно превышать прибыль от работы машины).



**Рисунок 5. – Суммарная прибыль, получаемая при эксплуатации погрузчика в зависимости от наработки с начала эксплуатации**

*Первый этап* характеризуется высокой производительностью, максимальными объемами полезно-выполняемой работы и работоспособностью машины, затраты на ремонты отсутствуют или очень малы, в основном затраты связаны с техническим обслуживанием, расходом топлива и смазочных материалов. Наблюдается высокая интенсивность роста экономического эффекта от работы машины. Продолжительность данного этапа и последующих существенно зависит от стоимости прибыли, получаемой за выполнение объемов работ. *Второй и третий этапы* – этапы прибыльной эксплуатации, после наработки окупаемости, равной 1400 моточасов. Организация вернула денежные средства, затраченные на приобретение объекта, и получает прибыль от ее эксплуатации. Затраты, связанные с поддержанием и восстановлением работоспособности, намного ниже получаемой прибыли. После 4000 моточасов (оптимальная наработка эксплуатации) работы машины затраты на обеспечение её работоспособности начинают возрастать, и общая прибыль снижается. После наработки 6650 моточасов затраты на ремонт существенно возрастают по сравнению с получаемой прибылью – начинается *четвертый этап* убыточной эксплуатации.

Основная задача при эксплуатации объекта – повышать его наработку на втором этапе, увеличивая наработку оптимальной эксплуатации по максимуму, а с её достижением проводить корректировки режимов эксплуатации и мероприятий по поддержанию и восстановлению работоспособности с целью повышения выходных параметров при выполнении полезной работы. Также важным моментом является определение целесообразных сроков прекращения эксплуатации объекта с целью постановки его на капитальный ремонт или списания. Для конкретной машины рациональной наработкой для прекращения эксплуатации машины будет наработка, рекомендуемая руководством по эксплуатации, которая составляет 6000 моточасов. Важный аспект эксплуатации объекта, учитываемый в технико-экономическом моделировании, – это выявление снижения значений выходных параметров (время рабочего цикла, удельный расход топлива, иные технические и экономические параметры), при которых использование машины становится убыточным. Отслеживание значений упомянутых выходных параметров в режиме функционирования наблюдаемого объекта является обязательным условием эксплуатации машин, что в эксплуатирующихся организациях возможно только при внедрении диагностирования, которое позволит своевременно заменить сборочные единицы при плановых ТО и ремонтах. Например, максимально используя методы неразрушающего диагностирования гидропривода машин [8–10]. Таким образом, становится понятно, что изменение технико-экономических показателей работы машины и ее технического состояния возможно прогнозировать путем моделирования, обеспечивая тем самым своевременное выполнение необходимых мероприятий по эффективной эксплуатации, а также по поддержанию и восстановлению работоспособности объекта на уровне, определяемом экономической целесообразностью его использования.

Концепция технико-экономического моделирования предполагает такой подход, при котором осуществляется учет первичной информации об эксплуатации машины, удовлетворяющий требованиям достоверности, непрерывности и достаточности. Информация собирается из различных источников (отделов предприятия) в единую базу данных, где осуществляется подготовка информации к обработке. Затем следует ее анализ и обработка на основании разработанных технико-экономических моделей с выдачей результатов о текущем уровне эксплуатации объекта, эффективности ее использования и о необходимых мероприятиях для обеспечения безотказной работы объекта. Используя методы моделирования на основе собранной информации об объектах наблюдений, можно осуществлять прогнозирование таких показателей, как: эффективность эксплуатации машины; возможные получаемые прибыли от ее эксплуатации; изменение

себестоимости машиночаса и стоимости выполнения работ, затрат, связанных с поддержанием и восстановлением работоспособности; определение рациональной периодичности проведения ремонтов и других выходных параметров, закладываемых в математическую модель.

**Заключение.** Техничко-экономические методы и математические модели, включающие в себя множество факторов, реализованные в виде специального программного обеспечения и позволяющие выполнить все расчеты в автоматическом режиме, могут быть востребованы конечным потребителем техники. Так, оператор сможет наблюдать за показателями эффективности работы машины, следить за изменением технического состояния и прогнозировать своевременность выполнения мероприятий по обслуживанию и ремонтам в зависимости от технического состояния машины. Руководитель организации сможет своевременно получать информацию по прибыли или убыткам от эксплуатации парка машин; сможет выявлять убыточные и прибыльные для организации виды работ и машины, их выполняющие, что упростит прогнозирование рентабельности предприятия. Будет также очевидна реальная картина экономической ситуации предприятия на основе принятых решений по вопросам использования машин и механизмов, а также приобретения их новых экземпляров и списания старых. Кроме того, решения о приобретении техники будут приниматься не только исходя из стоимости, но и прогнозируемых затрат на ее эксплуатацию на всем жизненном цикле.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Повышение этапа эксплуатации жизненного цикла гидрофицированных машин / А.Н. Максименко [и др.] // Строительная наука и техника. – 2011. – № 4. – С. 42–45.
2. Оценка эффективности этапов жизненного цикла строительных и дорожных машин с учетом изменений технико-экономических показателей в процессе их эксплуатации / А.Н. Максименко [и др.] // Грузовик. – 2013. – № 4. – С. 21–29.
3. Медведев, В.В. Применение имитационного моделирования для обеспечения надежности и безопасности судовых энергетических установок / В.В. Медведев. – СПб. : Страта, 2013. – 352 с.
4. Максименко, А.Н. Эксплуатация строительных и дорожных машин : учеб. пособие / А.Н. Максименко. – СПб. : БХВ-Петербург, 2006. – 400 с.
5. Максименко, А.Н. Оценка эффективности этапов жизненного цикла машины с учетом изменения технико-экономических показателей в процессе ее эксплуатации / А.Н. Максименко, В.В. Кутузов, Е.В. Кутузова. – Саарбрюккен (Германия) : LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012. – 188 с.
6. Оценка эффективности этапа эксплуатации жизненного цикла машины с учетом динамики выходных параметров в процессе ее использования / А.Н. Максименко [и др.] // Изв. Нац. акад. наук Беларуси. Серия физ.-техн. наук. – 2015. – № 1. – С. 52–59.
7. Погрузчики фронтальные одноковшовые (Амкодор 332В, Амкодор 332В4, Амкодор 342В, Амкодор 342В-01, Амкодор 342В4, Амкодор 352, Амкодор 352-10). Погрузчики торфа (Амкодор 342Р, Амкодор 342Р-01, Амкодор 342Р4, Амкодор 342Р4-01). Погрузчики универсальные (Амкодор 332С4, Амкодор 332С4-02, Амкодор 342С4, Амкодор 34204-02, Амкодор 352С, Амкодор 352С-01, Амкодор 352С-02, Амкодор 352С-10). Лесопогрузчики фронтальные универсальные (Амкодор 352Л, Амкодор 352Л-01, Амкодор 352Л-02) : Рук. по эксплуатации 342В.00.00.000РЭ / Л.Л. Гуменников [и др.]. – Минск : Амкодор, 2010. – 286 с.
8. Обеспечение работоспособности гидропривода технических средств / А.Н. Максименко [и др.] // Главный механик. – 2013. – № 8. – С. 11–18.
9. Определение остаточного ресурса гидропривода машин / А.Н. Максименко [и др.] // Грузовик. – 2015. – № 5. – С. 36–43.
10. Повышение работоспособности гидропривода строительных и дорожных машин при внедрении агрегатного метода ремонта и диагностики / А.Н. Максименко [и др.] // Грузовик. – 2010. – № 4. – С. 5–11.

Поступила 06.02.2019

#### FEATURE OF OPERATION OF OBJECTS WITH THE APPLICATION OF TECHNICAL AND ECONOMIC MODELING

V. KUTUZOV, B. MORGALIK, E. KOLIUKOVICH

*The article examines and analyzes changes in the technical and economic indicators of the machine at the stage of operation of its life cycle on the example of a front loader. The main tool of research is the results of technical and economic modeling, which allows, in a shorter period, to predict the state of an object and determine its technical and economic indicators, which are a criterion for the expediency of further using the object to solve practical and production problems.*

**Keywords:** technical-economical simulating, operation, fork-lift, efficiency, profit.

УДК 656.13

## ОЦЕНКА СУЩЕСТВЕННОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ АВАРИЙНОСТИ

канд. техн. наук С.А. АЗЕМША;

Т.В. ГРИЩЕНКО; О.О. ЯСИНСКАЯ

(Белорусский государственный университет транспорта, Гомель)

Анализируется статистика дорожно-транспортных происшествий с одним транспортным средством по их видам в Гомельской области за период с 2005 по 2018 год. На основании значений критерия Хи-квадрат производится оценка существенности изменений количества дорожно-транспортных происшествий с участием одного механического транспортного средства в разрезе их видов за рассматриваемый период времени. На основании таких расчетов формулируются соответствующие выводы. Показано, что уровень безопасности дорожного движения характеризуется рядом значений числовых абсолютных и относительных показателей.

**Ключевые слова:** дорожно-транспортные происшествия и их виды, существенность различий, критерий Хи-квадрат.

**Введение.** Уровень безопасности дорожного движения характеризуется рядом значений числовых абсолютных и относительных показателей, величины которых, как правило, колеблются в каждом отчетном году. Анализ величины изменения значений таких показателей, установлению их причин и прогнозированию значений на перспективу в специальной литературе уделено достаточно внимания. Вместе с тем время оценка существенности таких изменений не производится.

Большое количество научных работ по тематике безопасности дорожного движения [1; 2; 4 и др.] содержат анализ аварийности, который представлен графически или описан, опираясь на изменения показателей аварийности по годам. Такой подход к анализу изменения показателей аварийности позволяет констатировать факт их роста или снижения, однако не позволяет определить наличие или отсутствие существенности таких изменений. В результате сложно установить наличие обоснованной связи между реализованными мероприятиями по повышению безопасности дорожного движения и изменениями в показателях аварийности.

В представляемой нами научной работе для оценки существенности изменения показателей аварийности предлагается использовать критерий Хи-квадрат, который позволяет ответить на вопрос, влияет ли номинальный многоуровневый фактор на номинальный многоуровневый отклик. При этом номинальная шкала должна иметь не более 4...5 уровней. В противном случае может быть обнаружено влияние, которого в действительности нет.

С математической точки зрения процесс применения критерия Хи-квадрат состоит из трех основных шагов:

- 1) строится таблица сопряженностей, содержащая фактические частоты;
- 2) находятся ожидаемые частоты для случая «как фактор влияет на отклик»;
- 3) проверяется с помощью известных формул близость фактических и теоретических частот.

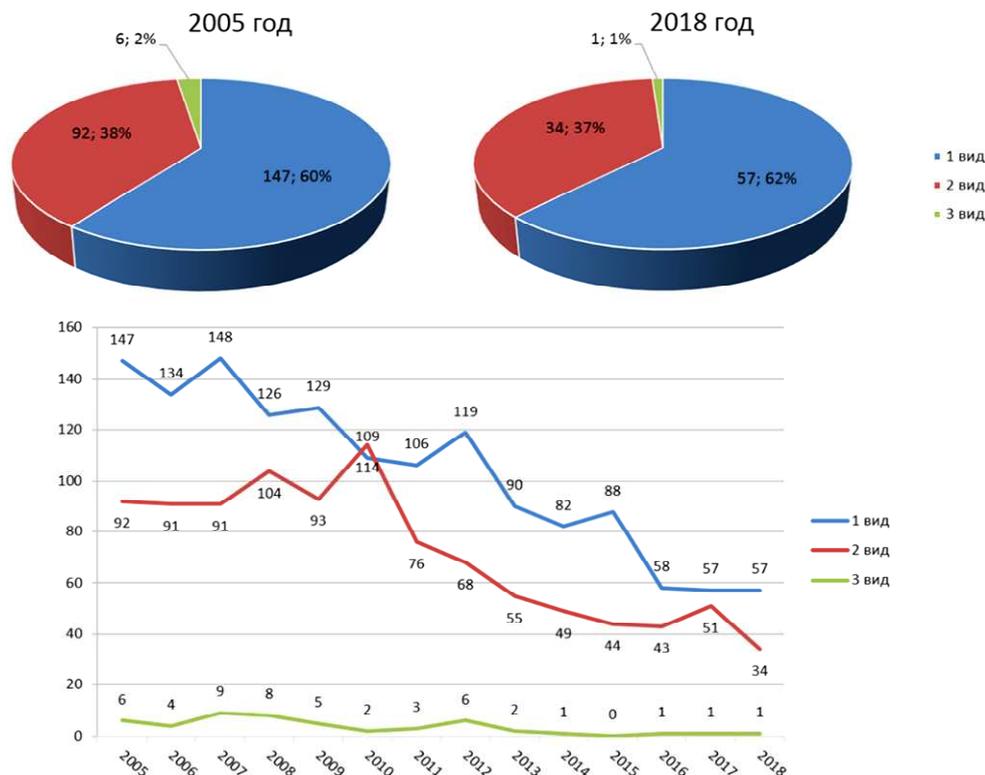
В качестве исходных данных использовались сведения о дорожно-транспортных происшествиях (ДТП) второй категории – с участием одного транспортного средства – в Гомельской области за период с 2005 по 2018 год в разрезе их видов.

**Основная часть.** В соответствии с действующим законодательством в Республике Беларусь предусмотрено три вида данной категории ДТП [3]:

- 1) опрокидывание;
- 2) наезд на препятствие;
- 3) наезд на животное.

На рисунке 1 представлены данные, отображающие структуру и динамику изменения *второй категории ДТП* и свидетельствующие о том, что рассматриваемый период наибольшую долю в ДТП анализируемой категории составляет первый вид – опрокидывание. Доля этого вида ДТП в общем количестве аварий данной категории составляет порядка 60%; наезд на препятствие (порядка 37%) составляют ДТП второго вида. Дорожно-транспортные происшествия *третьего вида* (наезд на животное) в общем числе аварий анализируемой категории несущественно и составляет около 3%.

Следует отметить, что за рассматриваемый 14-летний период наблюдается уменьшение количества ДТП анализируемой категории: 1) на 61,2% – опрокидывание; 2) на 63% – наезд на препятствие; 3) на 83,3% – наезд на животное. При этом абсолютное снижение числа ДТП с участием одного механического транспортного средства снизилось с 245 единиц в 2005 году до 92 в 2018, что составило 62,4%.



**Рисунок 1. – Динамика изменения ДТП с участием одного транспортного средства в разрезе их видов**

Визуальный анализ рисунка 1 позволяет сделать выводы о различиях в показателях аварийности как в абсолютном, так и в относительном выражении. Для установления существенности этих различий произведена аналитическая проверка при помощи критерия Хи-квадрат, реализованная в [5]. Для расчета этого критерия построены две таблицы:

- таблица фактических частот, в которой формируются данные по годам и видам второй категории ДТП (таблица 1);
- таблица ожидаемых частот, которая отражает, как фактор может повлиять на отклик, и показывает уровень значимости  $p$  (таблица 2).

Таблица 1. – Фактические значения частот видов ДТП второй категории с 2005 по 2009 год

Summary Frequency Table (Spreadsheet 4)  
Marked cells have counts > 5  
(Marginal summaries are not marked)

Вид второй категории	Годы					Row Totals
	2005	2006	2007	2008	2009	
1	147	134	148	126	129	684
2	92	91	91	104	93	471
3	6	4	9	8	5	32
All Grps	245	229	248	238	227	1187

Таблица 2. – Значения ожидаемых частот видов ДТП второй категории с 2005 по 2009 год

Summary Table: Expected Frequencies (Spreadsheet 4)  
Marked cells have counts > 5  
Pearson Chi-square: 5,50188, df = 8, p = 0,702830

Вид второй категории	Годы					Row Totals
	2005	2006	2007	2008	2009	
1	141,2	132,0	142,9	137,1	130,8	684,0
2	97,2	90,9	98,4	94,4	90,1	471,0
3	6,6	6,2	6,7	6,4	6,1	32,0
All Grps	245,0	229,0	248,0	238,0	227,0	1187,0

В таблицах 1 и 2 данные приведены с 2005 по 2009 год, так как наличие не более 5 уровней – условие применения критерия Хи-квадрат.

Из таблицы 1 видно, что для третьего вида второй категории некоторые ожидаемые частоты равны и ниже пяти. В общем количестве значения ДТП всех видов второй категории они составляют 13% и не превышают допустимой пороговой цифры. Поэтому критерий Хи-квадрат может быть применим.

Данные таблицы 2 указывают на то, что  $p = 0,702830$  и превышает 0,05, свидетельствуя тем самым о несущественности изменений ДТП всех видов второй категории за рассматриваемый период времени.

В таблице 3 сведены результаты аналогичных расчетов для трех периодов времени (2005–2009; 2010–2014; 2015–2018 гг.).

Таблица 3. – Оценка существенности различий количества ДТП по видам второй категории в целом за весь рассматриваемый период

Период, годы			
Значимость различий для ДТП	2005–2009 гг.	2010–2014 гг.	2015–2018 гг.
		несущественно	существенно

Из таблицы 3 видно, что существенность изменений в видах ДТП отмечается только в период с 2010 по 2014 год.

Далее определялась значимость изменения ДТП каждого вида второй категории отдельно за весь период и за два последующих года. Для этого все виды второй категории ДТП объединены в два множества. В первом множестве находятся ДТП первого вида второй категории (опрокидывание). Во втором множестве – ДТП всех остальных видов второй категории в целом. Динамика изменения первого вида ДТП второй категории отображена на рисунке 1, на котором видны различия в количестве ДТП данного вида как в абсолютном, так и в относительном выражении. Существенность этих различий установлена аналитической проверкой при помощи критерия Хи-квадрат, реализованной в [5].

Для расчета критерия Хи-квадрат также созданы таблицы:

- таблица фактических частот ДТП первого вида второй категории (опрокидывание), в которой формируются данные по годам и видам второй категории (таблица 4);

- таблица ожидаемых частот ДТП первого вида второй категории, которая отражает, как фактор может повлиять на отклик, и показывает уровень значимости  $p$  (таблица 5).

Таблица 4. – Фактические частоты ДТП первого вида второй категории за период с 2005 по 2009 год

Summary Frequency Table (Spreadsheet14)						
Marked cells have counts > 5 (Marginal summaries are not marked)						
Вид второй категории	Годы					Row Totals
	2005	2006	2007	2008	2009	
1	147	134	148	126	129	684
2–3	98	95	100	112	98	503
All Grps	245	229	248	238	227	1187

Как видно из таблицы 4, частота всех значений выше пяти. Следовательно, критерий Хи-квадрат может быть применим.

Таблица 5. – Ожидаемые частоты ДТП первого вида второй категории за период с 2005 по 2009 год

Summary Table: Expected Frequencies (Spreadsheet14)						
Marked cells have counts > 5 Pearson Chi-square: 3,26535, df = 4, p = 0,514445						
Вид второй категории	Годы					Row Totals
	2005	2006	2007	2008	2009	
1	141,2	132,0	142,9	137,1	130,8	684,0
2–3	103,8	97,0	105,1	100,9	96,2	503,0
All Grps	245,0	229,0	248,0	238,0	227,0	1187,0

Из таблицы 5 видно, что  $p = 0,514445$  (превышает 0,05). Это свидетельствует о несущественности изменений ДТП первого вида второй категории за рассматриваемый период времени. Результаты расчета критерия Хи-квадрат для ДТП первого вида второй категории по остальным временным периодам, а также для ДТП остальных видов второй категории приведены в таблице 6.

Таблица 6. – Оценка существенности различий количества ДТП видов второй категории по периодам времени

Значимость различий для ДТП второй категории	Период, годы		
	2005–2009	2010–2014	2015–2018
1 вид	несущественно	<i>существенно</i>	несущественно
2 вид	несущественно	<i>существенно</i>	несущественно
3 вид	несущественно	невозможность применения критерия Хи-квадрат	невозможность применения критерия Хи-квадрат

Далее устанавливалось наличие существенных изменений в значениях ДТП каждого вида второй категории за два следующих года. В таблице 7 приведен пример таких расчетов для ДТП первого вида второй категории (опрокидывание).

Таблица 7. – Оценка существенности различий количества ДТП первого вида второй категории в 2005 и 2006 годах

Summary Table: Expected Frequencies (Spreadsheet 1)			
Marked cells have counts > 5			
Pearson Chi-square: ,108094, df = 1, p = 0,742325			
Вид второй категории	Годы		Row Totals
	2005	2006	
1	145,2	135,8	281,0
2–3	99,8	93,2	193,0
All Grps	245,0	229,0	474,0

Из таблицы 7 видно, что частота всех значений для первого вида второй категории ДТП выше пяти, следовательно, критерий Хи-квадрат в данном случае может применяться. Кроме того,  $p = 0,742325$  (превышает 0,05), а это свидетельствует о несущественности изменений ДТП первого вида второй категории в 2006 году по отношению к 2005 году.

Аналогично были проведены парные расчеты по годам за период с 2005 по 2018 год и для всех видов второй категории ДТП. Результаты таких расчетов представлены в таблице 8.

Таблица 8. – Оценка существенности различий количества ДТП по видам второй категории ДТП

Период, годы	Значимость различий для ДТП			
	1 вид	2 вид	3 вид	
2005–2006	несущественно	несущественно	невозможность применения критерия Хи-квадрат	
2006–2007			несущественно	несущественно
2007–2008				<i>существенно</i>
2008–2009		несущественно		
2009–2010				
2010–2011				
2011–2012				
2012–2013				
2013–2014				
2014–2015				
2015–2016				
2016–2017				
2017–2018				

Сведения, представленные в таблице 8, указывают на то, что количество наездов на препятствия в 2010 году по отношению к 2009 году существенно изменилось.

Таким образом, в данной работе с применением критерия Хи-квадрат обнаружено наличие существенных изменений некоторых видов ДТП второй категории в Гомельской области, что позволяет выявить конкретные причины таких изменений и своевременно принять соответствующие меры реагирования.

**Заключение.** Проведенный в данной работе анализ показал снижение как общего числа ДТП с участием одного транспортного средства, так и по каждому из видов ДТП данной категории. В абсолютном выражении число ДТП данной категории уменьшилось с 245 в 2005 году до 92 в 2018, что эквивалентно относительному снижению на 62,4% (см. рисунок 1).

Данное исследование сопровождалось проверкой гипотезы о наличии существенности изменений в количестве ДТП с участием одного механического транспортного средства в разрезе их видов за весь рассматриваемый период, а также за каждые следующие друг за другом два календарных года. Для этих целей использовался критерий Хи-квадрат. Полученные результаты позволяют сформулировать следующие основные *выводы*:

- в период с 2010 по 2014 год в целом наблюдается существенное изменение ДТП с участием одного механического транспортного средства (см. таблицу 3);

- за этот же период наблюдается существенное изменение ДТП с участием одного механического транспортного средства первого и второго вида, т.е. опрокидывание и наезд на препятствие (см. таблицу б).

- анализ существенности изменения числа ДТП с участием одного механического транспортного средства в разрезе их видов за каждые два следующих друг за другом года показал наличие такой существенности только для ДТП 2-го вида (наезд на препятствие) в 2010 году по отношению к 2009 году.

Продолжение исследований в данной области видится в анализе мероприятий, направленных на повышение безопасности дорожного движения в Гомельской области, проведенных в период с 2005 по 2018 год и касающихся ДТП с участием одного механического транспортного средства, с последующим выявлением на этой основе направлений дальнейшего снижения аварийности.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Анализ аварийности и причины нарушения водителями правил дорожного движения по Пензенской области [Электронный ресурс] / И.Е. Ильина [и др.]. – Режим доступа: [https://elibrary.ru/download/elibrary\\_19009350\\_43417336.pdf](https://elibrary.ru/download/elibrary_19009350_43417336.pdf). – Дата доступа: 26.01.2019.
2. Чепикова, Т.П. Анализ аварийности и повышение безопасности дорожного движения [Электронный ресурс] / Т.П. Чепикова, А.А. Поварницын, Р.Ф. Шаихов. – Режим доступа: [https://elibrary.ru/download/elibrary\\_20282760\\_12564980.pdf](https://elibrary.ru/download/elibrary_20282760_12564980.pdf). Дата доступа: 25.01.2019.
3. О порядке государственного учета основных показателей в области дорожного движения и обеспечения его безопасности : постановление М-ва внутренних дел Респ. Беларусь от 28 мая 2003 г. № 129 : с изм. и доп.
4. Паршина, К.С. Снижение риска ДТП на основе анализа аварийности по месяцам года / К.С. Паршина ; науч. рук. Е.В. Печатнова // Экология и безопасность в техносфере: современные проблемы и пути решения : сб. тр. Всерос. науч.-практ. конф. молодых ученых, аспирантов и студентов, г. Юрга, 23–25 нояб. 2017 г. – Томск : Изд-во ТПУ, 2017. – С. 623–625.
5. Statistica 13.3. Computer program. Serial number JRR709H998119TE-A.

Поступила 06.02.2019

#### EVALUATION OF ESSENTIAL CHANGES INDICATORS OF EMERGENCY

S. AZEMSHA, T. GRISHCHENKO, O. YASINSKAYA

*This article analyzes the statistics of road accidents with one vehicle by their types in the Gomel region for the period from 2005 to 2018. Based on the values of the Chi-square criterion, an assessment is made of the materiality of changes in the number of road accidents involving one motor vehicle in terms of their types for the considered period of time. Based on such calculations, relevant conclusions are formulated.*

**Keywords:** traffic accident, kind of accidents, significance of differences, Chi-square test.

УДК 621.91.02/621.88.082.1

## ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ БЛОЧНО-МОДУЛЬНЫХ РАСТОЧНЫХ РЕЖУЩИХ ИНСТРУМЕНТОВ

*д-р техн. наук, проф. Н.Н. ПОПОК;  
А.А. ГЕРАСИМОВ; Е.М. ТИХОН  
(Полоцкий государственный университет)*

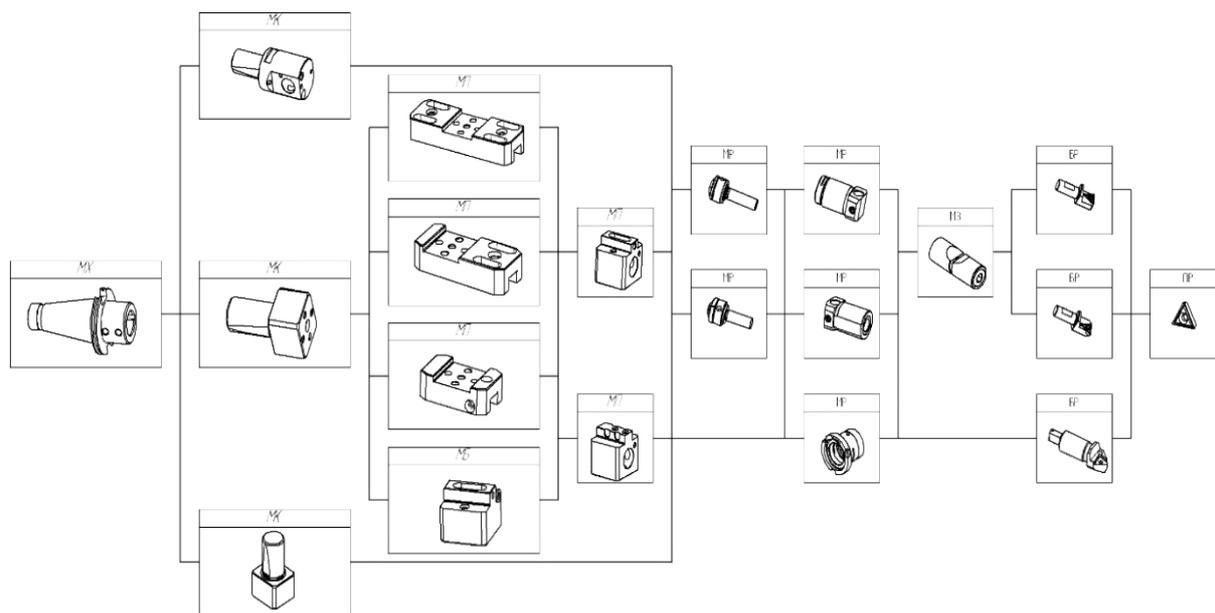
*Рассмотрена система блочно-модульных расточных режущих инструментов с микрометрической настройкой лезвий. Предложена и проанализирована модель напряжений и перемещений в резьбовом механизме настройки. Приведены результаты экспериментальных исследований точности и жесткости инструментов. Даны рекомендации по проектированию высокоточных расточных головок, патронов и резцовых вставок.*

**Ключевые слова:** расточные режущие инструменты, точность, резцовые вставки, моделирование.

**Введение.** В машиностроении широкое распространение получили детали с высокоточными отверстиями, поверхности которых обрабатываются расточными режущими инструментами. Потребность в расточных режущих инструментах постоянно возрастает. Более 60% этой потребности удовлетворяется за счет закупки импортного инструмента, так как отечественные производители не обеспечивают требуемой точности и жесткости расточных режущих инструментов. Анализ конструкций расточных режущих инструментов свидетельствует о том [1; 2], что предлагаются различные модульные инструментальные системы, включающие расточные резцы, расточные головки, патроны, резцовые вставки (микроборы) и отличающиеся размерами модулей, механизмами закрепления и перемещения, что исключает взаимозаменяемость модулей и резцовых вставок, снижает их жесткость, а следовательно, не обеспечивает требуемую точность обрабатываемых поверхностей отверстий.

Для удовлетворения отечественного машиностроения в расточных режущих инструментах необходимо *повысить* точность позиционирования режущих лезвий и жесткость инструмента, *обеспечить* технологичность изготовления и сборки инструмента, *унифицировать* конструктивные элементы деталей и узлов. В совокупности эти технические решения позволят снизить себестоимость расточного инструмента и обеспечат импортозамещение. Повышению точности и жесткости расточного режущего инструмента будут способствовать более технологичные в изготовлении и сборке поверхности сопряжений модулей, резьбовые соединения и компенсаторы резьбовых зазоров в механизме микрометрической настройки режущих лезвий, пазы (гнезда) для установки режущих пластин.

**Моделирование напряжений и перемещений в механизме микрометрической настройки режущих лезвий.** Разработана система блочно-модульных расточных режущих инструментов (БМРРИ) с микрометрической настройкой лезвий (рисунок 1).



**Рисунок 1. – Система блочно-модульных расточных режущих инструментов**

Разработанная система блочно-модульных расточных режущих инструментов применяется на станках с ЧПУ, координатно-расточных станках при обработке поверхностей отверстий в диапазоне диаметров 10...360 мм с точностью по 6...7 квалитетам [3].

Система включает расточные головки в диапазоне растачиваемых отверстий с диаметрами от 63 до 360 мм; расточные патроны – от 10 до 63 мм; резцовые блоки, или резцовые вставки, в том числе с микрометрической настройкой лезвий, позволяющие обрабатывать отверстия диаметром менее 10 мм.

Отличительными особенностями и преимуществами БМРПИ являются:

- обеспечение взаимозаменяемости и ремонтпригодности за счет унифицированных модулей:
  - МХ – модуль хвостовой;
  - МК1...МК3 – модуль корпусный;
  - МП1...МП3 – модуль переходной (между МК и МБ);
  - МБ – модуль балансировочный;
  - МП4...МП5 – модуль переходной (между МБ и МР);
  - МР1...МР5 – модуль регулировочный; МЗ – модуль зажимной;
  - БР1...БР3 – блок резцовый;
  - ПР – пластина режущая;
- технологичность изготовления и сборки за счет применения открытых плоских и цилиндрических поверхностей сопрягаемых деталей модулей;
- возможность использования модулей и резцовых блоков в других типах режущих инструментов;
- повышение точности и качества обработки за счет возможности регулировки унифицированных модулей.

Точность расточных режущих инструментов с регулируемыми резцовыми вставками (блоками) зависит от точности исполнения резьбового соединения «винт-гайка». Для повышения точности этого резьбового соединения в большинстве случаев используется разрезная гайка (втулка), которая позволяет регулировать зазоры в резьбе и тем самым повышать точность перемещения резцовых вставок. Как правило, соединение винта с разрезной втулкой делается в сжатом или разжатом состоянии втулки.

Приведение резьбового соединения в рабочее положение производится путем снятия напряжения сжатия или разжатия, в результате которого происходит компенсация зазоров в резьбовом соединении. При этом ставится задача по выбору материала втулки и винта, их термообработке, допусков на резьбу винта и втулки, размеров нарезаемых пазов во втулке – глубины, ширины, шага пазов и других параметров, обеспечивающих требуемую точность перемещений при сохранении работоспособности режущего инструмента в пределах заданного стандартом периода стойкости.

Для решения указанной выше задачи произведено моделирование резьбового соединения «винт-втулка» в программной среде «ANSYS» (рисунок 2).

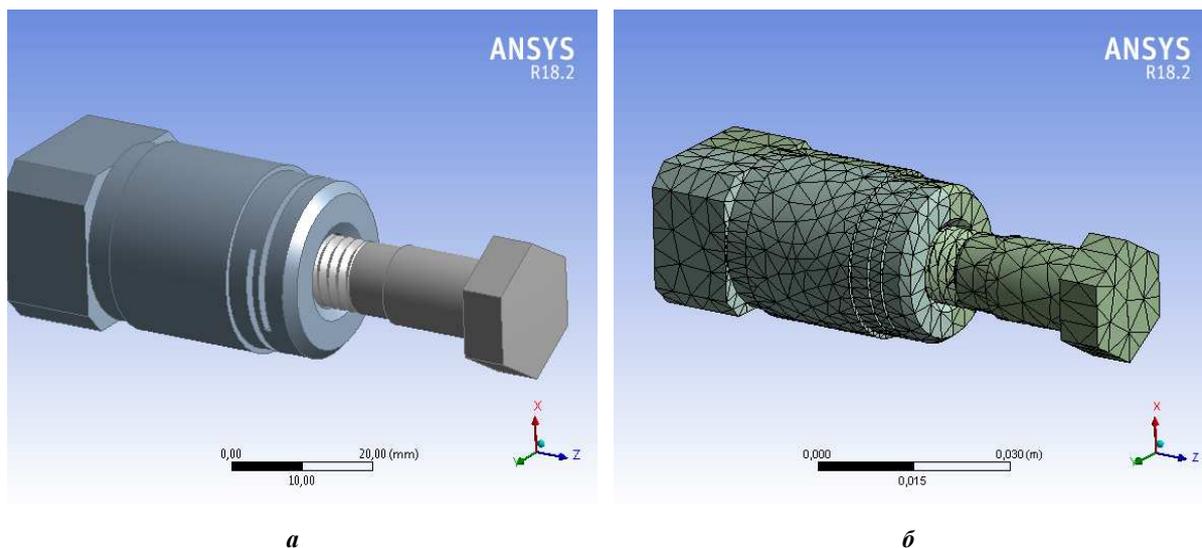


Рисунок 2. – Трехмерная модель втулки и винта (а) с разбивкой на элементы (б)

Моделируется резьба М12 с шагом 0,5 и 1 мм, выполненная с точностью 6г. Глубина прорезаемого паза составляет 18 и 21 мм; ширина – 1 и 1,5 мм; шаг паза – 1 и 1,5 мм.

Составляется план полного факторного эксперимента (моделирования), включающий три фактора: глубину, ширину, шаг паза во втулке.

Все три указанных выше фактора варьируются на двух уровнях их значений – максимальном и минимальном (таблица 1).

Таблица 1. – План полного факторного эксперимента (моделирования)

Образец	Ширина паза (b), мм	Шаг паза (t), мм	Глубина паза (B), мм
Образец 1	1	1	18
Образец 2	1	1	21
Образец 3	1	1,5	18
Образец 4	1	1,5	21
Образец 5	1,5	1	18
Образец 6	1,5	1	21
Образец 7	1,5	1,5	18
Образец 8	1,5	1,5	21

При изменении осевой нагрузки на резьбу от 50 до 200 Н рассматриваются напряжения в резьбовом соединении и перемещения винта (рисунок 3).

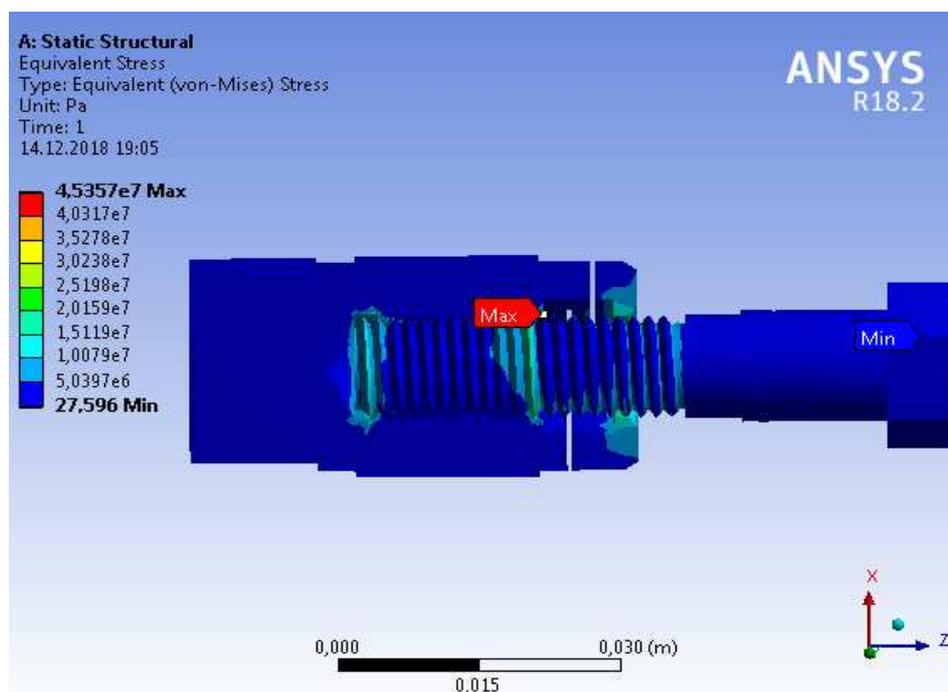


Рисунок 3 – Карта распределения напряжений, полученная в программе Ansys

Цель эксперимента (моделирования) – определение предельной осевой нагрузки, при которой напряжение не превосходит предела прочности заданного материала.

При этом гарантируется минимальный зазор в резьбовом соединении и требуемая точность перемещений резцовой вставки.

Анализ результатов моделирования показывает (рисунок 4):

- с увеличением нагрузки величины перемещения и напряжения растут;
- наиболее приемлемыми для последующих исследований являются образцы под номерами 1, 4, 5 и 8, так как в них не возникает слишком больших и слишком малых нагрузок.

Из этих вариантов выбирается наиболее рациональный – образец под номером 1, так как он имеет наибольшие перемещения и обеспечивает минимальные зазоры в резьбовом соединении при любом значении нагрузки.

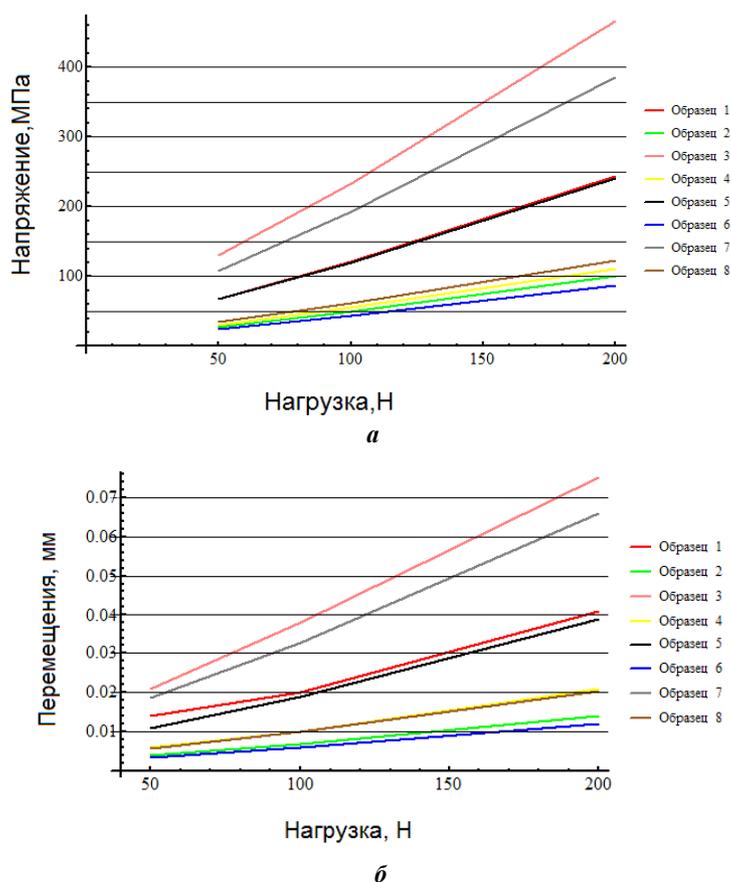


Рисунок 4. – Зависимости напряжений (а) и перемещений (б) в резьбовом соединении от нагрузки при различных размерах глубины, ширины и шага пазов втулки

**Экспериментальные исследования резьбовых соединений механизма настройки.** При проведении экспериментальных исследований точности и жесткости резьбовых соединений «винт-втулка» использовались стандартные методики, сертифицированные материалы образцов, оборудование и измерительная аппаратура.

Образцы втулок и винта (рисунок 5) изготовлены из стали 45 ГОСТ 1050, наружный диаметр втулки – 24 мм, длина – 47 мм, винты M12 6g и M12 6h с шагом резьбы 0,5; 0,75; 1; 1,5 мм. Твердость втулки 42...54 HRC, винта – 20...30 HRC. Образцы изготовлены в количестве 8 штук – по количеству опытов полного факторного эксперимента, предусматривающего изменение трех факторов (размеров пазов) на минимальном и максимальном уровнях: ширина  $b = 1; 1,5$  мм; шаг  $t = 1; 1,5$  мм; глубина  $B = 18; 21$  мм.

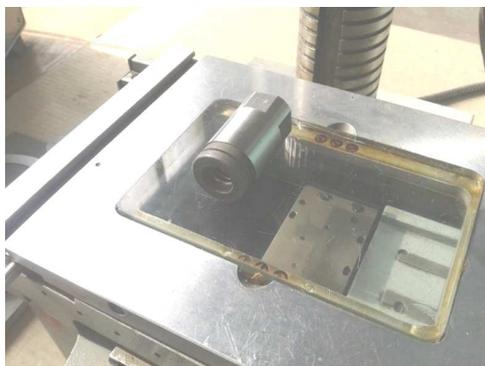


Рисунок 5. – Образец втулки

Методикой эксперимента предусматривается ввинчивание винта в разрезную резьбовую втулку, которая предварительно разжимается или сжимается. После снятия усилий разжатия или сжатия втулки

винт последовательно и многократно ввинчивается и вывинчивается, при этом фиксируется отклонение  $\Delta$  (перемещение винта) и крутящий момент  $M_{кр}$  на винте (рисунок 6).

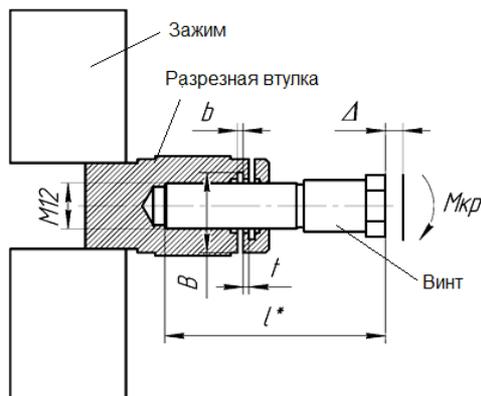


Рисунок 6. – Схема физической модели перемещений и крутящих моментов

Для разжатия образцов используются мерные пластины, вставляемые в пазы втулки. Выбор размера пластин определяется заданным шагом резьбы. Для сжатия образцов используется специальный съемник. Отклонение перемещений винта фиксируется на измерительном микроскопе модели Norgau NVM-4030D. На данном микроскопе также измеряются размеры пазов во втулке и шаг резьбы. Для измерения крутящего момента используется динамометрический ключ.

Жесткость резьбового соединения определяется с помощью динамометра модели ЗИП 05-82.

В результате экспериментальных исследований установлено (таблица 2), что отклонения длины втулки до и после разжатия близки к размерам ширины пазов и кратны шагу резьбы.

Таблица 2. – Разница размеров втулок до и после разжатия

№ втулки	Ширина паза ( $b$ ), мм	Шаг паза ( $t$ ), мм	Глубина паза ( $B$ ), мм	Значения выполненных измерений			Среднее
				измерение 1	измерение 2	измерение 3	
1	1	1	18	1,06	1,01	1,08	1,05
2	1	1	21	1,07	1,01	0,98	1,02
3	1	1,5	18	1,02	1,12	1,06	1,07
4	1	1,5	21	0,94	0,96	1,02	0,98
5	1,5	1	18	1,51	1,43	1,51	1,49
6	1,5	1	21	1,57	1,6	1,44	1,54
7	1,5	1,5	18	1,48	1,55	1,5	1,51
8	1,5	1,5	21	1,46	1,44	2,5	1,47

Измерение крутящих моментов показывает (таблицы 3, 4), что уменьшение зазора в резьбовом соединении (резьба M12 6h) приводит к росту значений крутящих моментов примерно в 1,3...1,5 раза.

Таблица 3. – Моменты от винта 6h при разжатии втулки

№ образца	Ширина паза ( $b$ ), мм	Шаг паза ( $t$ ), мм	Глубина паза ( $B$ ), мм	Момент, Н·м (расклинено)	Момент, Н·м (вставки убраны)	Плечо, м
1	1	1	18	1	1,5	0,1
2	1	1	21	0	0,5	0,1
3	1	1,5	18	0,5	1	0,1
4	1	1,5	21	0	0,5	0,1
5	1,5	1	18	0	0	0,1
6	1,5	1	21	0	0	0,1
7	1,5	1,5	18	2,5	8	0,1
8	1,5	1,5	21	1,5	4	0,1

Таблица 4. – Моменты от винта 6g при разжатии втулки

№ образца	Ширина паза (b), мм	Шаг паза (t), мм	Глубина паза (B), мм	Момент, Н·м (расклинено)	Момент, Н·м (вставки убраны)	Плечо, м
1	1	1	18	0,5	1	0,1
2	1	1	21	0	0,5	0,1
3	1	1,5	18	0	0,5	0,1
4	1	1,5	21	0	0,5	0,1
5	1,5	1	18	0	0	0,1
6	1,5	1	21	0	0	0,1
7	1,5	1,5	18	1	5	0,1
8	1,5	1,5	21	0	2,5	0,1

Значения крутящих моментов также возрастают при уменьшении глубины паза с 21 до 18 мм.

Установлено, что винт перемещается без люфтов и резьба не деформируется при равной ширине и шаге пазов и их значениях, равных от одного до двух шагов резьбы.

Аналогичные зависимости отклонений длины втулки и крутящих моментов установлены при исследовании резьбовых соединений в предварительно сжатом состоянии (таблицы 5, 6): при уменьшении зазора в резьбе (винт М12 6h) крутящий момент возрастает примерно в 1,5 раза; моменты в резьбовом соединении при ввинчивании винта в сжатую втулку не возникают из-за отсутствия отклонения осей двух частей втулки; винт перемещается без люфтов, резьба не деформируется при равной ширине и шаге пазов в пределах от одного до двух шагов резьбы.

Таблица 5. – Моменты от винта 6h при сжатии втулки

№ образца	Ширина паза (b), мм	Шаг паза (t), мм	Глубина паза (B), мм	Момент, Н·м (сжато)	Момент, Н·м (напряжение снято)	Плечо, м
1	1	1	18	0	1,5	0,1
2	1	1	21	0	1	0,1
3	1	1,5	18	0	1	0,1
4	1	1,5	21	0	0,5	0,1
5	1,5	1	18	0	0	0,1
6	1,5	1	21	0	0	0,1
7	1,5	1,5	18	0	4,5	0,1
8	1,5	1,5	21	0	2	0,1

Таблица 6. – Моменты от винта 6g при сжатии втулки

№ образца	Ширина паза (b), мм	Шаг паза (t), мм	Глубина паза (B), мм	Момент, Н·м (сжато)	Момент, Н·м (напряжение снято)	Плечо, м
1	1	1	18	0	1	0,1
2	1	1	21	0	0,5	0,1
3	1	1,5	18	0	0	0,1
4	1	1,5	21	0	0,5	0,1
5	1,5	1	18	0	0	0,1
6	1,5	1	21	0	0	0,1
7	1,5	1,5	18	0	4	0,1
8	1,5	1,5	21	0	2	0,1

Значения крутящих моментов при предварительном сжатии втулок ниже на 25...50% по сравнению с разжатым, что позволяет изготавливать втулки с большими значениями размеров паза при больших значениях шага резьбы. Измерение жесткости разрезных втулок показывает, что увеличение глубины паза с 18 до 21 мм приводит к уменьшению жесткости втулки в 1,5...1,7 раза.

Результаты проведенного моделирования и экспериментальных исследований позволили предложить расточной инструмент [4], в котором глубина пазов определяется по формуле:

$$B = D - t,$$

где  $D$  – внешний диаметр резцедержателя;  $t$  – шаг пазов.

Разработан широкий спектр расточных головок, патронов и резцовых вставок, реализующих инструментальную систему БМРРИ [3]. Отличительная особенность этого ряда инструментов – наличие унифицированной разрезной резьбовой втулки, позволяющей компенсировать зазоры в резьбе. Например, разработанная резцовая вставка (рисунок 7) включает: сборочный узел «резьбовая вставка» 1; стакан 2; втулку 3; шарик 4; пробку 5.

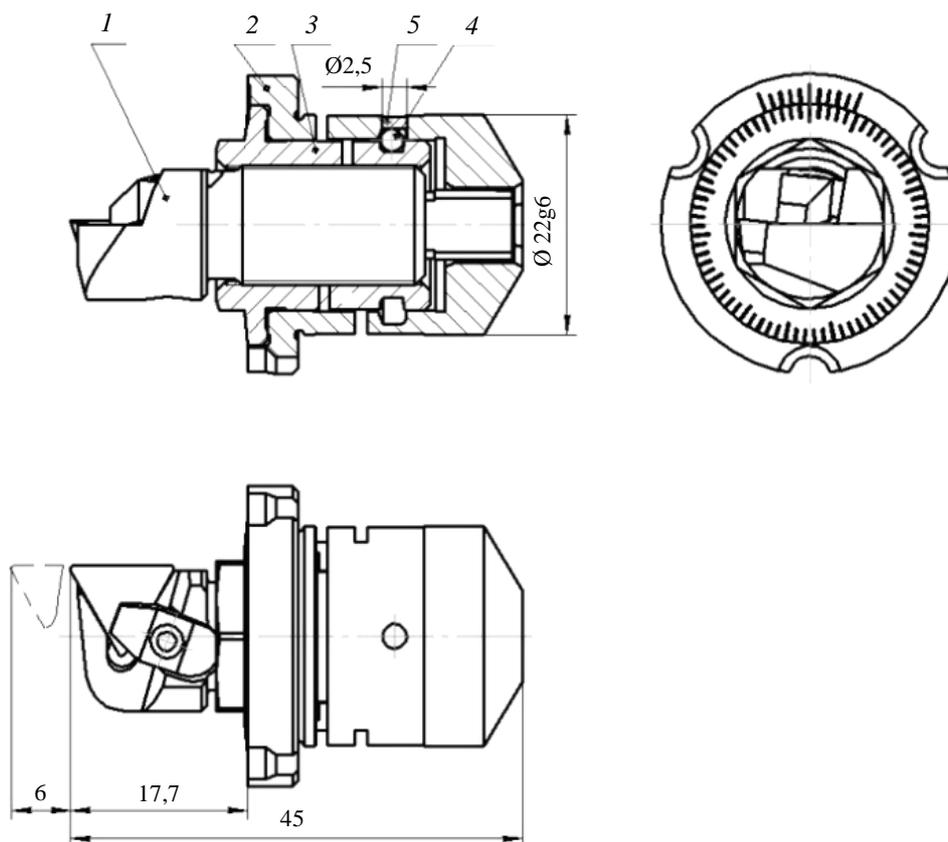


Рисунок 7. – Резцовая вставка с креплением режущей пластины прихватом

В «резьбовой вставке» 1 державка-винт служит для установки режущей пластины и ее перемещения за счет резьбового соединения с втулкой 3, выполненного со степенью точности 4g...6g.

Для компенсации возможных зазоров в резьбовом соединении во втулке выполнены радиальные пазы, размеры которых определяются на основе рассмотренных выше результатов моделирования и эксперимента. На внешней поверхности втулки 3 и внутренней поверхности стакана 2 выполнена канавка, в которую при сжатии разрезной втулки устанавливаются закаленные шарики 4 через отверстие в стакане, закрываемое пробкой 5. Шарики перекатываются в канавках втулки и стакана, передают упругую силу от стакана к втулке, минимизируя тем самым зазор в резьбовом соединении. Шарики также способствуют уменьшению трения в резьбе при значительных усилиях предварительного натяга.

Лабораторные и производственные испытания экспериментальных образцов резцовых вставок показали их работоспособность.

Точностные параметры резцовых вставок не уступают зарубежным аналогам.

**Заключение.** Конечным итогом проведенного исследования стали следующие научные результаты:

- получена математическая модель расчета напряжений и перемещений в БМРРИ, позволяющая оптимизировать геометрические параметры винта и разрезной втулки в механизмах настройки режущих лезвий;

- *установлены зависимости* напряжений и перемещений модулей от нагрузок на механизм настройки, позволяющие научно обосновать уменьшение зазоров в резьбовом соединении для повышения точности и жесткости инструмента;

- *даны рекомендации* для создания требуемого натяга в резьбовом соединении, в котором предварительное сжатие резьбовой втулки со следующими размерами пазов: глубина – 4/5 от диаметра втулки, ширина и шаг равны и изменяются в диапазоне их размеров от одного до двух шагов резьбы;

- *разработана инструментальная система и новые конструкции* блочно-модульных расточных головок, патронов и резцовых вставок, отличающихся повышенной точностью и жесткостью.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Попок, Н.Н. Анализ тенденций проектирования инструментальных систем // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В. Промышленность. Прикладные науки. – 2012. – № 3. – Ч. 1 : Термины и системы обозначений режущих пластин, державок и модулей. – С. 71–81.
2. Herasimau, A. Cartridge toolholders and boring heads for high-precision holes treatment / N. Popok // Materials of VI junior researchers' conference, 2012. – P. 91–94.
3. Конструирование и оснащение технологических комплексов / А.М. Русецкий [и др.] ; под общ. ред. А.М. Русецкого. – Минск : Беларус. навука, 2014. – 316 с. – (Технологические комплексы: проектирование, производство, применение).
4. Расточной инструмент : пат. на полез. модель ВУ 9108 / Н.Н. Попок, Терентьев В.А., А.А. Герасимов. – Оpubл. 01.03.2013.

*Поступила 11.02.2019*

#### IMPROVING THE ACCURACY OF BLOCK-MODULAR BORING CUTTING TOOLS

*N. POPOK, A. GERASIMOV, E. TIKHON*

*The system of block-modular boring cutting tools with micrometric blade setting is considered, model of stresses and displacements in a threaded adjustment mechanism is proposed and analyzed, the results of experimental researches of the accuracy and rigidity of tools are given, recommendations on the design of high-precision boring heads, cartridges and tool inserts are given.*

**Keywords:** *boring cutting tools, accuracy, tool inserts, modeling.*

## МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

УДК 621.723

### ВЛИЯНИЕ ВРЕМЕНИ ИОННО-ПЛАЗМЕННОГО АЗОТИРОВАНИЯ В ВОДОРОДСОДЕРЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ НА ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГАЗОТЕРМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ ИЗ ПРОВОЛОЧНЫХ ВЫСОКОХРОМИСТЫХ СТАЛЕЙ

*Е.В. АСТРАШАБ; канд. техн. наук А.Н. ГРИГОРЧИК; д-р физ.-мат. наук, проф. В.А. КУКАРЕКО;  
д-р техн. наук, доц. М.А. БЕЛОЦЕРКОВСКИЙ; канд. техн. наук А.В. СОСНОВСКИЙ  
(Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, Минск)*

*Исследовано структурно-фазовое состояние и трибомеханические свойства газотермических покрытий из стали 20X13, напыленных по различным технологическим режимам методом высокоскоростной металлизации с использованием высокоэнтальпийного газа МАФ, а также подвергнутых ионно-плазменному азотированию в водородсодержащей среде. Установлено, что максимальная износостойкость покрытий в исходном состоянии при сухом трении регистрируется для покрытий, напыленных при давлении воздуха 0,1 МПа; ионно-плазменное азотирование в течение 12 часов приводит к увеличению износостойкости примерно в 37...88 раз.*

**Ключевые слова:** газотермическое покрытие, ионно-плазменное азотирование, восстановление оксидов, сухое трение, износостойкость.

**Введение.** Метод высокоскоростной металлизации (ВМ) – один из интенсивно развивающихся способов газотермического напыления, позволяющих с высокой производительностью формировать защитные и износостойкие покрытия на деталях различной конфигурации. Метод ВМ основан на распылении расплавленных электрической дугой проволочных материалов продуктами сгорания горючих газов. Продукты сгорания горючего газа, истекая через сопло Лавала [1] приобретают скорость 900...1500 м/с, и частицы распыляемого материала разгоняются до скоростей порядка 300...500 м/с, что позволяет формировать плотные покрытия с высокими прочностными и физико-механическими свойствами [2].

В качестве горючего газа при металлизации традиционно используется пропан [2; 3]. Вместе с тем применение горючего газа МАФ (метилацетилен-алленовая фракция) с более высокой температурой горения обеспечивает повышение таких свойств покрытий, как плотность, адгезионная прочность, износостойкость, а также уменьшает степень окисления частиц напыляемого материала [4–6]. Несмотря на это, газотермические покрытия (ГТП), полученные методом ВМ с использованием различных горючих газов, имеют физико-механические свойства ниже, чем у монолитных сталей.

Для повышения физико-механических свойств покрытий целесообразно использовать режимы напыления, приводящие к формированию покрытий с пониженным содержанием оксидов, а также применять в качестве последующей обработки современные методы инженерии поверхности. Одним из эффективных методов инженерии поверхности служит ионно-плазменное азотирование (ИПА). При ИПА в поверхностных слоях покрытий образуются нитридные фазы, существенно повышающие микротвердость и износостойкость покрытий [4]. Необходимо отметить, что ионное азотирование может проводиться при большом количестве водорода в насыщающей среде, который, в свою очередь, способен активно восстанавливать оксиды, содержащиеся в газотермических покрытиях. Таким образом, в процессе ИПА возможно одновременное восстановление оксидов в покрытиях, а также насыщение их поверхностных слоев атомами азота, что до настоящего времени не изучалось.

Цель данной работы – исследование влияния технологических параметров напыления и различных режимов ионного азотирования газотермических покрытий из высокохромистой стали 20X13, полученных методом ВМ с использованием высокоэнтальпийного горючего газа МАФ, на их структурно-фазовое состояние и трибомеханические свойства.

**Материалы и методики испытаний.** В качестве объектов исследований выбраны газотермические покрытия из проволочной высокохромистой стали 20X13, напыленные с использованием высокоэнтальпийного газа МАФ при различных давлениях воздуха в исходном состоянии и после ионно-плазменного азотирования.

Напыление газотермических покрытий методом ВМ проводилось на установке АДМ-10, разработанной в ОИМ НАН Беларуси [2]. Давление воздуха, идущего на горение горючего газа, составляло 0,1, 0,2 и 0,3 МПа. Напыленные покрытия подвергались механической шлифовке с финишной обработкой на абразивной бумаге (Р320). Толщина напыленных покрытий составляла около 1,0...1,2 мм.

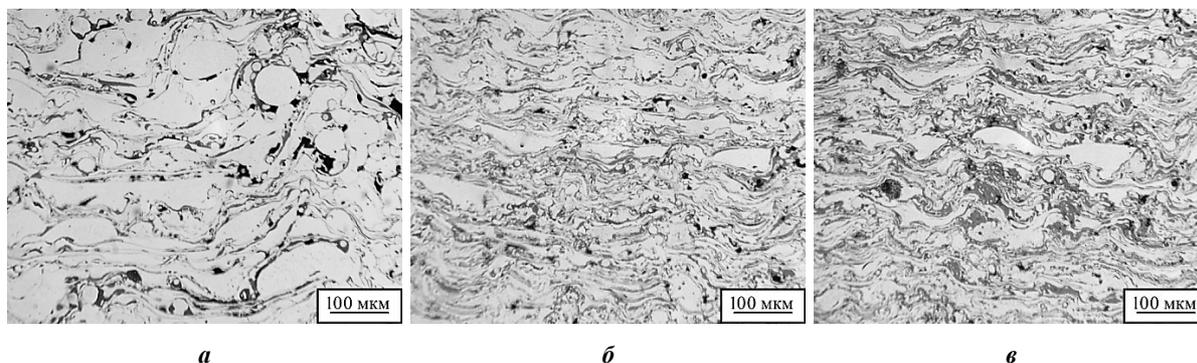
Ионно-плазменное азотирование напыленных покрытий из стали 20X13 проводилось при различном количестве газа восстановителя (водорода) в насыщающей среде. Температура азотирования составляла 530 °С; время – 12 ч (через рабочую камеру печи прошло 80 л водорода), 55 ч (через рабочую камеру печи прошло 280 л водорода).

Исследование фазового состава покрытий осуществлялось на дифрактометре ДРОН-3.0 в монохроматизированном кобальтовом ( $\text{CoK}_\alpha$ ) излучении при напряжении 28 кВ и анодном токе 14 мА. Расшифровка рентгенограмм осуществлялась с использованием программного обеспечения Crystallographica Search-Match с картотекой PDF-2.

Измерение твердости и микротвердости покрытий проводилось по методу Виккерса, на твердомере DuraScan 20 при нагрузках на индентор 25 г и 10 кг. Металлографические исследования – на оптическом микроскопе АЛЬТАМИ МЕТ 1МТ с использованием программного обеспечения AltamiStudio 3.3. Пробоподготовка осуществлялась на шлифовально-полировальной станции Tegramin-25.

Сравнительные триботехнические испытания проводились в режиме сухого трения по схеме возвратно-поступательного движения призматического образца (8×6×5 мм) по пластинчатому контртелу при средней скорости взаимного перемещения  $\approx 0,1$  м/с. В качестве контртела использовалась пластина (90×30×3 мм), изготовленная из закаленной углеродистой стали У8, с твердостью 700 HV 10. Номинальная удельная нагрузка испытаний  $P$  в условиях сухого трения составляла 1,5 МПа. Путь трения  $L \approx 1200$  м, с промежуточными замерами массового износа.

**Результаты исследований и их обсуждение.** На рисунке 1 представлены характерные микроструктуры покрытий из стали 20X13, напыленных с использованием горючего газа МАФ по различным режимам.



**Рисунок 1. – Характерные микроструктуры газотермических покрытий из стали 20X13, напыленных с использованием горючего газа МАФ при давлении воздуха 0,1 МПа (а); 0,2 МПа (б); 0,3 МПа (в)**

Из рисунка 1 видно, что с увеличением давления воздуха, идущего на горение газа МАФ, в сформированных покрытиях повышается количество оксидов. В таблице 1 представлены данные, отражающие объемное содержание оксидов, а также пористость газотермических покрытий из стали 20X13, напыленных по различным режимам с использованием горючего газа МАФ.

**Таблица 1. – Содержание оксидов и пористость газотермических покрытий из стали 20X13, полученных при различном давлении воздуха при металлизации**

Материал ГТП и давление воздуха при напылении		Содержание оксидов, об. %	Пористость, об. %
20X13	0,1 МПа	8	5
	0,2 МПа	12	3
	0,3 МПа	15	2,5

Данные таблицы 1 свидетельствуют, что с увеличением давления подачи воздуха с 0,1 до 0,3 МПа количество оксидов в напыленных покрытиях примерно повышается с 8 до 15 об. %. Увеличение содержания оксидов при повышении давления воздуха в процессе напыления связано с уменьшением размера распыляемых частиц и повышением удельной площади поверхности частиц. Таким образом, диспергирование напыляемых частиц при металлизации приводит к увеличению интенсивности их окисления и, как следствие, к формированию покрытий с высоким содержанием оксидов. При этом пористость покрытий уменьшается с повышением давления воздуха, что связано с увеличением скорости потока распыляемых частиц.

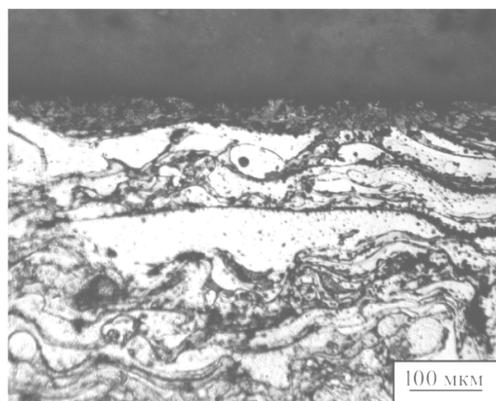
Исследование фазового состава газотермических покрытий из высокохромистой стали 20X13, напыленных с использованием горючего газа МАФ при различном давлении воздуха, показало, что во всех

покрытиях содержится преимущественно  $\alpha$ -Fe, а также различное количество оксидов  $Fe_3O_4$  и FeO. Твердость газотермических покрытий из стали 20X13, напыленных при давлениях воздуха 0,1, 0,2 и 0,3 МПа, составляет 220, 275 и 320 HV 10 соответственно. Повышение твердости связано с большим диспергированием напыленных частиц, а также с увеличением содержания в покрытии оксидов, которые, в свою очередь, имеют повышенную твердость по сравнению с металлическими частицами.

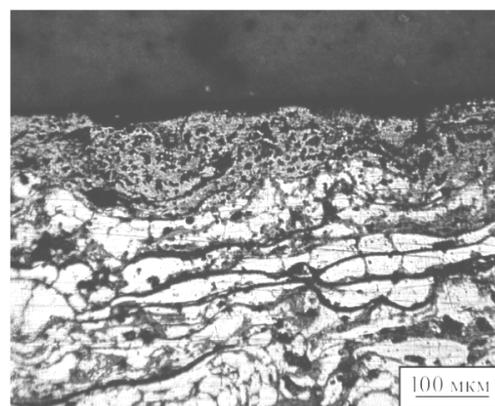
Данные таблицы 2 и рисунок 2 иллюстрируют глубину и микроструктуру азотированных слоев ГТП из стали 20X13 в водородсодержащей среде. Глубина азотированных слоев в покрытиях из стали 20X13, напыленных при давлении воздуха 0,1 и 0,3 МПа, после ИПА в течение 12 ч отличается примерно в 1,5 раза. Различие глубин модифицированных азотом слоев связано с разным содержанием на границах металлических частиц покрытий оксидных прослоек (см. таблицу 1), которые затрудняют диффузионный перенос атомов азота в более глубокие слои покрытий [7; 8]. После ИПА в течение 55 ч происходит выравнивание глубин азотированных слоев в покрытиях ( $\approx 75 \dots 80$  мкм).

Таблица 2. – Глубина азотированных слоев в поверхностных слоях газотермических покрытий из стали 20X13, напыленных с использованием горючего газа МАФ по различным режимам

Давление воздуха при напылении покрытий из стали 20X13, МПа	Глубина азотированного слоя после 12 ч ИПА, мкм	Глубина азотированного слоя после 55 ч ИПА, мкм
0,1	60	75
0,2	50	75
0,3	40	80



а



б

Рисунок 2. – Характерные микроструктуры газотермических покрытий из стали 20X13, напыленных с использованием горючего газа МАФ при различном давлении воздуха и подвергнутых ионно-плазменному азотированию при 530 °С:

а – давление воздуха 0,1 МПа + ИПА в течение 12 ч; б – давление воздуха 0,1 МПа + ИПА в течение 55 ч

Результаты рентгеноструктурного анализа газотермических покрытий из стали 20X13, напыленных по различным режимам и прошедших ИПА в водородсодержащей среде, приведены в таблице 3.

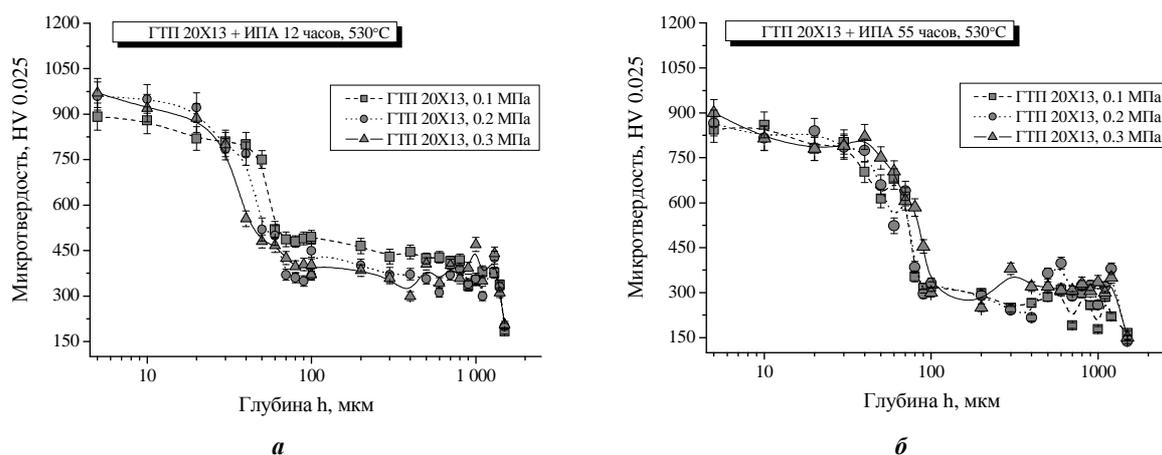
Таблица 3. – Фазовый состав газотермических покрытий из стали 20X13, напыленных по различным режимам и подвергнутых ионно-плазменному азотированию

Давление воздуха при напылении и время ИПА газотермического покрытия из стали 20X13		Фазовый состав
0,1 МПа	+ ИПА 12 часов	$\alpha$ -Fe, $Fe_4N$ , CrN, $Fe_3N$ , $Fe_3O_4$ , FeO
	+ ИПА 55 часов	$\alpha$ -Fe, $Fe_4N$ , CrN, $Fe_3N$ , $Fe_3O_4$ , FeO
0,2 МПа	+ ИПА 12 часов	$Fe_4N$ , $\alpha$ -Fe, CrN, $Fe_3N$ , $Fe_3O_4$ , FeO
	+ ИПА 55 часов	$Fe_4N$ , $\alpha$ -Fe, CrN, $Fe_3N$ , $Fe_3O_4$ , FeO
0,3 МПа	+ ИПА 12 часов	$Fe_4N$ , $\alpha$ -Fe, CrN, $Fe_3N$ , $Fe_3O_4$ , FeO
	+ ИПА 55 часов	$Fe_4N$ , $\alpha$ -Fe, CrN, $Fe_3N$ , $Fe_3O_4$ , FeO

По приведенным в таблице 3 данным можно судить, о том, что поверхностные слои азотированных ГТП, напыленных при давлении воздуха 0,2 и 0,3 МПа, содержат относительно повышенное количество нитридов  $Fe_4N$ , CrN и  $Fe_3N$ .

Необходимо отметить, что поверхностные слои азотированного покрытия, напыленного при давлении воздуха 0,1 МПа, содержат относительно пониженное количество нитридных фаз. Это связано с диффузионным переносом атомов азота на большую глубину покрытия (см. таблицу 2), так как в нем содержится пониженное количество оксидных прослоек, тормозящих диффузию азота (см. таблицу 1) [7; 8]. Кроме того, в результате азотирования покрытий, напыленных при давлении воздуха 0,2 и 0,3 МПа, поверхностные слои преимущественно содержат нитриды  $Fe_4N$  и  $CrN$ .

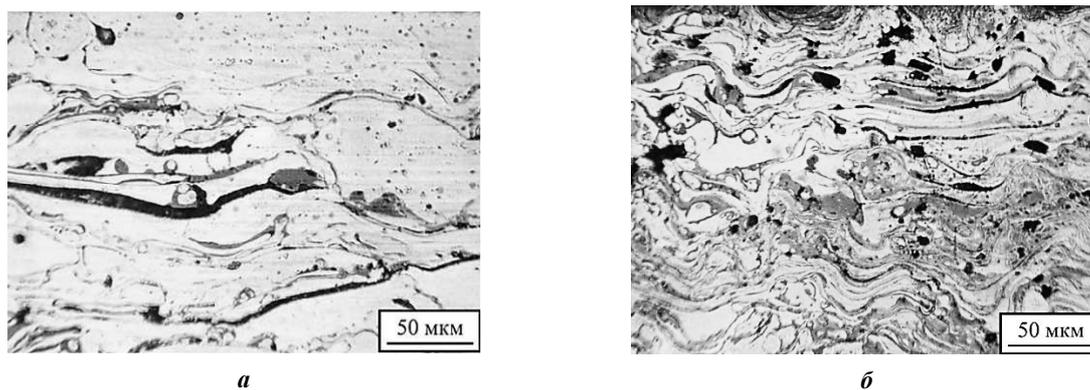
Микротвердость покрытий из стали 20X13, прошедших ионно-плазменное азотирование, существенно возрастает по сравнению с исходным состоянием (рисунок 3). В частности, микротвердость поверхностных слоев покрытий после ИПА в течение 12 часов составила  $\approx 900 \dots 1000$  HV 0,025, а после ИПА в течение 55 часов – примерно  $800 \dots 900$  HV 0,025 (рисунок 3). Понижение твердости поверхности азотированных слоев после ИПА в течение 55 часов связано с диффузией азота вглубь покрытий в результате длительной выдержки, что сопровождается снижением концентрации азота в поверхностных слоях покрытия.



*a* – ИПА в течение 12 часов (80 л водорода); *б* – ИПА в течение 55 часов (280 л водорода)

**Рисунок 3. – Распределение микротвердости по глубине газотермических покрытий из стали 20X13, напыленных по различным режимам и подвергнутых ионно-плазменному азотированию в водородсодержащей среде**

При ИПА в водородсодержащей среде в поверхностных слоях ГТП помимо образования нитридных фаз происходит восстановление оксидов железа активным газом-восстановителем – водородом. Снижение количества оксидов в поверхностных слоях газотермических покрытий за счет их восстановления в процессе ионно-плазменного азотирования в водородсодержащей среде регистрируется как рентгеноструктурным, так и металлографическим анализом (рисунок 4).

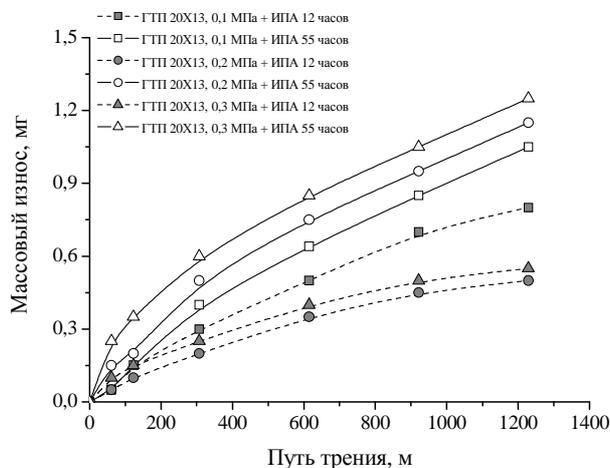


*a* – давление воздуха 0,1 МПа + ИПА в течение 12 ч; *б* – давление воздуха 0,3 МПа + ИПА в течение 55 ч

**Рисунок 4. – Характерные микроструктуры газотермических покрытий из стали 20X13, напыленных с использованием горючего газа МАФ при различном давлении воздуха и подвергнутых ионно-плазменному азотированию при 530 °С в водородсодержащей среде (без травления)**

Из рисунка 4 видно, что в составе поверхностных слоев ГТП после ИПА в водородсодержащей среде наблюдается пониженное количество оксидов между частицами по сравнению с исходным состоянием (см. рисунок 1).

Сравнительные триботехнические испытания образцов газотермических покрытий из сталей 20X13 в исходном состоянии и подвергнутых ИПА в условиях трения без смазочного проводились при удельном давлении испытаний 1,5 МПа. Результаты триботехнических испытаний отображены на рисунке 5 и в таблице 4.



**Рисунок 5. – Зависимость массового износа газотермических покрытий из стали 20X13 после ИПА в водородсодержащей среде, напыленных по различным режимам, от пути трения**

Таблица 4. – Результаты триботехнических испытаний газотермических покрытий из стали 20X13, напыленных по различным режимам в исходном состоянии и после ионно-плазменного азотирования при 530 °С в водородсодержащей среде

Материал покрытия	Режим напыления и режим ионно-плазменного азотирования		Интенсивность массового изнашивания в условиях сухого трения, $I_q \cdot 10^{-3}$ мг/м
	давление воздуха при напылении	обработка покрытий	
20X13	0,1 МПа	Исходное состояние	20,2
		ИПА 12 часов	0,54
		ИПА 55 часов	0,75
	0,2 МПа	Исходное состояние	26,0
		ИПА 12 часов	0,32
		ИПА 55 часов	0,70
	0,3 МПа	Исходное состояние	28,3
		ИПА 12 часов	0,32
		ИПА 55 часов	0,70

Из данных триботехнических испытаний в условиях сухого трения видно, что с увеличением давления воздуха, используемого для горения горючего газа при напылении, интенсивность массового изнашивания ( $I_q$ ) покрытий увеличивается. Это связано с повышенным содержанием оксидов, которые располагаются на границах напыленных частиц и по которым преимущественно происходит разрушение покрытия при трении в условиях жесткого адгезионного взаимодействия.

Ионно-плазменное азотирование покрытий приводит к существенному повышению их износостойкости в условиях сухого трения (см. таблицу 4). Интенсивность массового изнашивания покрытий из стали 20X13 после ИПА в течение 12 часов уменьшилась примерно в 37...88 раз, а после ИПА 55 часов – приблизительно в 27...40 раз по сравнению с исходным состоянием. Данное увеличение износостойкости покрытий связано с образованием в их поверхностных слоях нитридов  $Fe_4N$ ,  $CrN$  и  $Fe_3N$ , а также с уменьшением содержания количества оксидов в покрытии за счет их восстановления в водородсодержащей среде. Более высокая износостойкость покрытий, обработанных атомами азота в течение 12 часов, обусловлена повышенным уровнем твердости модифицированного азотом слоя.

Таким образом, можно сделать вывод, что максимальной износостойкостью в исходном состоянии характеризуются газотермические покрытия из стали 20X13, напыленные при давлении воздуха 0,1 МПа. В случае ионной обработки максимальная износостойкость в условиях сухого трения регистрируется для покрытий из стали 20X13, напыленных при давлении воздуха 0,2 и 0,3 МПа и прошедших ИПА при 530 °С в водородсодержащей среде в течение 12 часов.

**Заключение.** В данной научной работе исследовано влияние давления воздуха, идущего на горение горючего газа и распыление расплавленных частиц, а также влияние различных режимов ионного азотирования газотермических покрытий из высокохромистой стали 20X13, полученных методом высокоскоростной металлизации с использованием высокоэнтальпийного горючего газа МАФ, на их структурно-фазовое состояние и трибомеханические свойства.

Установлено, что в результате ионно-плазменного азотирования в водородсодержащей среде газотермических покрытий, напыленных с использованием высокоэнтальпийного газа МАФ при различных давлениях воздуха, в поверхностных слоях образуются нитриды  $Fe_4N$ ,  $CrN$  и  $Fe_3N$ , а также происходит восстановление оксидов, содержащихся в покрытии. Показано, что микротвердость поверхностных слоев покрытий повысилась примерно до 900...1000 HV 0,025 после азотирования в течение 12 часов и примерно до 800...900 HV 0,025 – после азотирования в течение 55 часов.

Результаты триботехнических испытаний в условиях сухого трения показали, что интенсивность массового изнашивания покрытий из стали 20X13 после ИПА в течение 12 часов уменьшилась примерно в 37...88 раз, а после обработки в течение 55 часов – в 27...40 раз по сравнению с исходным состоянием.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Белоцерковский, М.А. Активированное газопламенное и электродуговое напыление покрытий проволочными материалами / М.А. Белоцерковский, А.С. Прядко // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2006. – № 12. – С. 17–23.
2. Белоцерковский, М.А. Технологии активированного газопламенного напыления антифрикционных покрытий / М.А. Белоцерковский. – Минск : Технопринт, 2004. – 200 с.
3. Белоцерковский, М.А. Методы и оборудование для формирования высокоэнергетических двухфазных потоков / М.А. Белоцерковский, А.С. Прядко, А.Е. Черепко // Физика плазмы и плазменные технологии. – Минск, 1997. – Т. 4. – С. 670–673.
4. Триботехнические свойства модифицированных ионами азота покрытий из высокохромистых сталей, напыленных с использованием высокоэнтальпийного газа / М.А. Белоцерковский [и др.] // Беларусь – место интеграции запада и востока. Будущее развитие промышленного потенциала республики : междунар. симп. «Технологии. Оборудование. Качество», Минск, 29 мая – 1 июня 2018 г. : сб. докл. / Белорус. нац. техн. ун-т ; редкол.: С.В. Харитончик [и др.]. – Минск : БНТУ, 2018. – С. 98–102.
5. Структурно-фазовое состояние и трибомеханические свойства обработанных ионами азота газотермических покрытий из высоколегированных сталей, напыленных с использованием высокоэнтальпийного газа / Е.В. Астрашаб [и др.] // Современные методы и технологии создания и обработки материалов : сб. науч. тр. : в 3 кн. ; редкол.: А.В. Белый (гл. ред.) [и др.]. – Минск : ФТИ НАН Беларуси, 2018. – Кн. 2 : Технологии и оборудование механической и физико-технической обработки. – С. 6–17.
6. Григорчик, А.Н. Структурно-фазовое состояние и трибомеханические свойства газотермического покрытия из высокохромистой стали 40X13, напыленного с использованием высокоэнтальпийного газа МАФ / А.Н. Григорчик, Е.В. Астрашаб // Металлургия : респ. межведомств. сб. науч. тр. – Минск : БНТУ, 2017. – Вып. 38. – С. 157–166.
7. Особенности формирования модифицированного азотом слоя при ионно-лучевой обработке гиперзвукового газотермического покрытия из аустенитной стали / А.Н. Григорчик [и др.] // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2016. – № 7. – С. 41–46.
8. Закономерности диффузии азота в процессе ионно-лучевого азотирования газотермического покрытия из аустенитной стали 06X19H9T / А.Н. Григорчик [и др.] // Механика машин, механизмов и материалов. – 2016. – № 2. – С. 75–80.

Поступила 22.02.2018

#### EFFECT OF ION-PLASMA NITROGENING TIME IN HYDROGEN-CONTAINING MEDIUM ON TRIBOTECHNICAL PROPERTIES OF GASOTHERMIC COATINGS FROM WIRE HIGH CHROME STEELS

*E. ASTRASHAB, A. GRIGORCHIK, V. KUKAREKO,  
M. BELOTSERKOVSKIY, A. SOSNOVSKIY*

*The structural-phase state and tribomechanical properties of gas-thermal coatings from steel 20X13, sprayed on various technological modes by high-speed metallization using high-enthalpy gas MAF, as well as subjected to ion-plasma nitriding in a hydrogen-containing medium were investigated. It was established that the maximum wear resistance of coatings in the initial state under dry friction is recorded for coatings sprayed at air pressure 0,1 MPa. Ion-plasma nitriding for 12 hours leads to an increase in wear resistance  $\approx$  37...88 times.*

**Keywords:** *gas-thermal coating, ion-plasma nitriding, oxide reduction, dry friction, wear resistance.*

УДК 546.05

## УСКОРЕНИЕ СИНТЕЗА ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СЛОИСТЫХ ДВОЙНЫХ ГИДРОКСИДОВ ПРИ УЛЬТРАЗВУКОВОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

чл.-корр. НАН Беларуси, д-р техн. наук В.В. РУБАНИК

(Институт технической акустики Национальной академии наук Беларуси, Витебск)

Рассматриваются слоистые двойные гидроксиды, которые благодаря своим уникальным анионо-обменным свойствам широко используются для очистки воды, доставки лекарств *in vivo*, активной коррозионной защиты и во многих других приложениях. Основным методом производства таких гидроксидов является соосаждение из растворов солей соответствующих двух- и трехвалентых металлов с последующей кристаллизацией и анионным замещением. Эта процедура не требует соблюдения строгих условий, но занимает время от нескольких дней до нескольких недель. В данной работе на разных этапах приготовления кобальт-алюминиевых слоистых двойных гидроксидов использованы ультразвуковые колебания, что позволило значительно ускорить процессы кристаллизации и анионного обмена. Предложен механизм влияния ультразвука на указанные процессы.

**Ключевые слова:** слоистые двойные гидроксиды, анионный обмен, ультразвуковая обработка.

**Введение.** Слоистые двойные гидроксиды (СДГ) состоят из чередующихся параллельных положительно заряженных слоев из гидроксидов двухвалентых и трехвалентых металлов  $M^{II}_{1-x}M^{III}_x(OH)_2]^{x+}$  и компенсирующих заряд анионов  $(A^{n-})_{xy}$ , а также молекул воды в межслоевом пространстве [1]. Для обозначения химического состава СДГ обычно используется краткая форма  $M^{II}(n)M^{III}-A$ , где  $n = (1-x)/x$  – атомное соотношение катионов  $M^{II}$  и  $M^{III}$  в слое. Благодаря слоистой структуре и электростатической природе взаимодействия СДГ могут быть интеркалированы различными по природе и размерам анионами и анионными комплексами. Слоистые двойные гидроксиды используются в катализе, однако основное применение СДГ связано с уникальной способностью этих материалов к анионному обмену. В качестве анионообменников и адсорбентов СДГ находят все более широкое применение как наноконтейнеры для доставки активных веществ и лекарств *in vivo* [2], в покрытиях с активной антикоррозионной защитой [3], в системах для очистки воды от ионов токсичных элементов и соединений [4] и др.

Функциональность СДГ может быть расширена за счет особых свойств катионов в слоях, например магнитных. В научном издании [5] сообщалось о необычном магнитном поведении слоистых двойных гидроксидов, содержащих  $Co^{II}$ :  $Co(2)Al-NO_3$  и  $Co(3)Al-NO_3$ .

Некоторые СДГ встречаются в качестве природных минералов, большинство же синтезировано путем химических или электрохимических реакций. Основной способ получения СДГ – соосаждение из водного раствора солей металлов  $M^{II}$  и  $M^{III}$ , как правило, нитратов или хлоридов. В типичной реакции в раствор по капельно добавляется щелочь или кислота, чтобы достигнуть уровня pH, при котором гидроксиды металлов начинают выпадать в осадок с образованием слоистого двойного гидроксида. Этот процесс занимает от одного до нескольких часов. Образовавшийся мелкодисперсный осадок выдерживают 2...4 часа на водяной бане при температуре около 100 °С, чтобы завершить процесс кристаллизации и получить наиболее однородные по размеру кристаллиты. Синтезированные таким образом слоистые двойные гидроксиды содержат в межслоевом пространстве анионы из исходных солей металлов. Для большинства применений СДГ должны быть «заряжены» функциональными анионами: биологически активными веществами, ингибиторами коррозии и т.п. Эта процедура выполняется посредством анионного обмена в соответствующих водных растворах. Для полного замещения нитратов или хлоридов в межслоевом пространстве СДГ требуется от нескольких часов до нескольких недель, в зависимости от типа замещающего аниона.

**Экспериментальная часть.** В данной работе исследовалось применение ультразвука для ускорения и возможного сокращения числа этапов получения функциональных СДГ путем соосаждения. В качестве объекта исследования выбран кобальт-алюминиевый слоистый гидроксид с соотношением Co/Al, равным 2.

Ультразвуковое воздействие осуществлялось на трех разных этапах приготовления СДГ:

- 1) на стадии соосаждения (синтеза);
- 2) на стадии завершения кристаллизации и гомогенизации;
- 3) на стадии анионного обмена.

Фазовый состав и степень кристалличности СДГ после каждой стадии подвергались сравнительному анализу, сопоставляя его характеристики с соответствующими характеристиками продукта, полученного стандартным методом, без применения ультразвука.

Для получения СДГ стандартным методом в раствор, содержащий 0,5М  $\text{Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  и 0,25 М  $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ , покапельно добавлялся в 1,5 М раствор  $\text{NaNO}_3$  при непрерывном перемешивании. В течение процедуры соосаждения, которая проводилась при комнатной температуре, величина pH смеси контролировалась и поддерживалась на уровне, равном 8, путем добавления 2 М раствора  $\text{NaOH}$ . Полученная суспензия выдерживалась на водяной бане в течение 4 часов, затем промывалась деионизированной водой и центрифугировалась 1,5 мин при  $10^4$  об/мин. Процедура промывки с последующим центрифугированием повторялась три раза для того, чтобы удалить остаточный  $\text{NaNO}_3$ . Слоистый двойной гидроксид в виде порошка получен высушиванием чистого продукта при  $60^\circ\text{C}$  в течение 24 часов.

В экспериментах с ультразвуком использовался процессор Sonics VCX 1500 (максимальная мощность 15 кВт при 20 кГц).

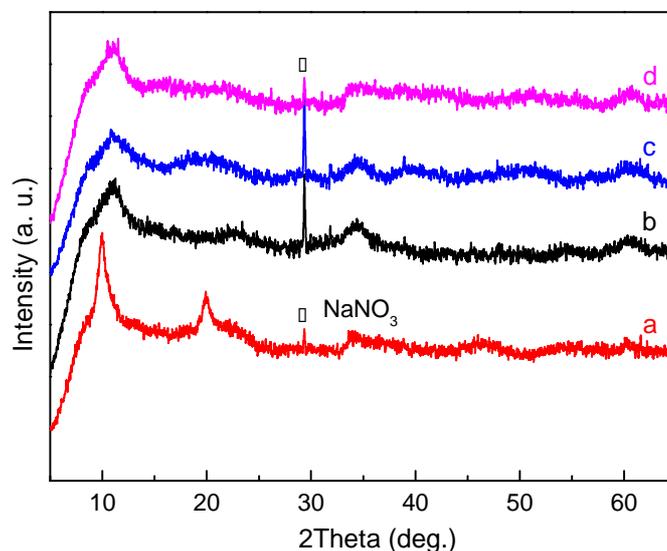
*Первый эксперимент* был предпринят с целью проверки возможности сокращения продолжительной по времени стадии соосаждения стадией прямого синтеза в растворе с применением ультразвука. Растворы  $\text{Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{NaNO}_3$  и  $\text{NaOH}$  в таких же относительных количествах, как и в случае использования стандартного метода, были смешаны и подвергнуты ультразвуковой обработке в течение 3, 5 или 10 мин.

Во *втором эксперименте* суспензия  $\text{Co(2)Al-NO}_3$  обрабатывалась ультразвуком в течение 2, 5 или 10 мин сразу после стандартной процедуры соосаждения (без применения водяной бани).

В *третьем эксперименте* ставилась задача ускорить реакцию анионного обмена нитрата на карбонат. Суспензия  $\text{Co(2)Al-NO}_3$  после последовательных стадий соосаждения и кристаллизации на водяной бане была помещена в 0,1 М раствор  $\text{NaCO}_3$  при комнатной температуре. Величина pH смеси была доведена до 8 путем добавления 2 М раствора  $\text{NaOH}$ , после чего смесь обрабатывалась ультразвуком в течение 7 мин.

Небольшие количества (около 100 мг) суспензии после каждой стадии процесса формирования СДГ были центрифугированы, промыты и высушены (как описано выше), а затем исследованы рентгенодифракционным методом с использованием дифрактометра PANalytical X'Pert Powder (излучение  $\text{CuK}\alpha$ , Ni-фильтр, детектор PIXcel<sup>1D</sup>, шаг сканирования  $0,02^\circ$ , время экспозиции 1,5 с/шаг).

**Результаты и их обсуждение.** Дифрактограммы образцов СДГ  $\text{Co(2)Al-NO}_3$ , синтезированных из смеси соответствующих нитратов либо с использованием стандартной процедуры соосаждения, либо путем прямого синтеза с применением ультразвука, представлены на рисунке 1.



**Рисунок 1.** – Дифрактограммы слоистых двойных гидроксидов  $\text{Co(2)Al-NO}_3$ , синтезированных либо с использованием стандартной процедуры соосаждения (a), либо путем ультразвуковой обработки при 1,5 кВт смеси соответствующих нитратов в течение 3 мин (b), 5 мин (c) и 10 мин (d) с последующей 4-х часовой выдержкой на водяной бане при температуре около  $100^\circ\text{C}$

*Примечание.* На дифрактограммах обозначен наиболее интенсивный дифракционный пик от остаточного нитрата натрия.

Как видно из рисунка 1, во всех случаях, когда ультразвуковые колебания воздействовали непосредственно на смесь реактивов в попытке прямого синтеза  $\text{Co(2)Al-NO}_3$ , вне зависимости от времени ультразвуковой обработки, желаемая фаза не была получена. Хотя на дифрактограммах образцов наблюдаются

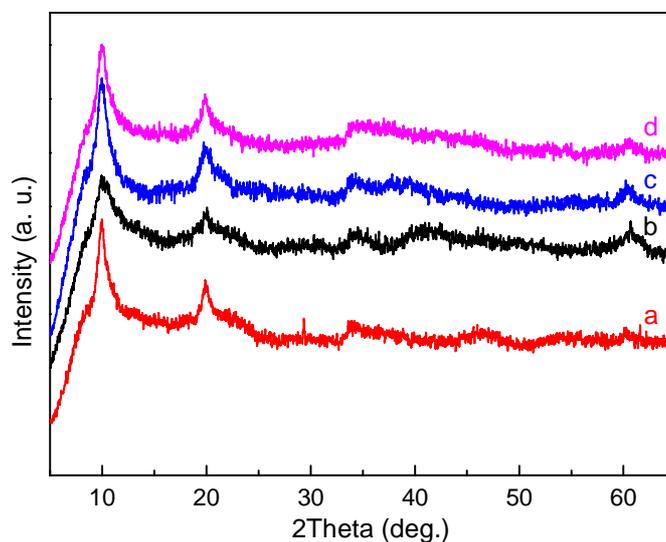
размытые пики, которые можно ассоциировать со структурой СДГ (см. рисунок 1, графики *b*, *c* и *d*). Эти пики смещены по отношению к угловым положениям, характерным для слоистого двойного гидроксида  $\text{Co(2)Al-NO}_3$  (рисунок 1, график *a*).

Приготовление СДГ с использованием стандартного метода соосаждения занимает 1...2 часа и требует постоянного контроля и коррекции уровня pH раствора. В случае же прямого синтеза с наложением ультразвуковых колебаний, несмотря на то, что уровень pH стартового раствора был доведен до требуемой величины, отсутствовала техническая возможность контролировать и корректировать уровень pH в процессе ультразвуковой обработки. Предположительно, в эксперименте с прямым синтезом величина pH изменялась непредсказуемо, что могло приводить как к отклонениям в соотношении катионов  $\text{Co}^+/\text{Al}^+$ , равном 2, в образующейся фазе СДГ, так и к интеркаляции анионов гидроксида наряду (или вместо) анионов нитрата.

Выдержка суспензии на водяной бане после соосаждения – важный этап формирования СДГ. На этой стадии завершается процесс кристаллизации, а размеры кристаллитов выравниваются по размеру.

В данной работе была предпринята попытка заменить 4-часовую стадию ультразвуковой обработки несколькими минутами.

Дифрактограммы образцов, полученных в результате ультразвуковой обработки суспензии СДГ (рисунок 2, графики *b*, *c*, *d*), весьма схожи с дифрактограммой образца  $\text{Co(2)Al-NO}_3$ , приготовленного из той же суспензии с последующей 4-часовой выдержкой на водяной бане (рисунок 2, график *a*).



**Рисунок 2. – Дифрактограммы СДГ  $\text{Co(2)Al-NO}_3$ , синтезированных с использованием стандартной процедуры соосаждения и затем либо выдержанных 4 часа на водяной бане при температуре около  $100^\circ\text{C}$  (*a*), либо обработанных ультразвуком в течение 2 минут (*b*), 5 минут (*c*) или 10 минут (*d*)**

Сходство дифрактограмм особенно явно прослеживается для образца, полученного из суспензии, обработанной ультразвуком в течение 5 минут.

Таким образом, 4-часовая стадия выдержки суспензии СДГ на водяной бане может быть эффективно заменена 5-минутной стадией ультразвуковой обработки. Столь значительное сокращение времени на кристаллизацию и гомогенизацию кристаллитов можно отнести на счет акустической кавитации, вызванной ультразвуком высокой мощности [6].

Как известно [7], акустическая кавитация – это образование, рост и схлопывание пузырьков в жидкости, находящейся в ультразвуковом поле. Схлопывание пузырьков (адиабатическое сжатие) создает локальные ударные волны и локальный разогрев среды.

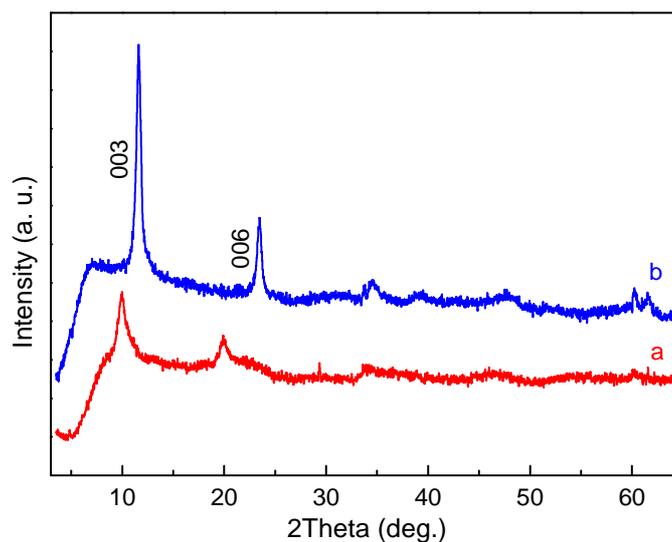
Результаты, полученные в данном эксперименте с применением ультразвука для ускорения кристаллизации СДГ, хорошо согласуются с данными, опубликованными в других работах по приготовлению наноматериалов с использованием ультразвуковых волн [8–10].

Для того чтобы получить слоистый гидроксид, содержащий в межслоевом пространстве определенный тип аниона (или анионного комплекса), после синтеза (соосаждения с последующей кристаллизацией) проводится анионный обмен в растворе, содержащем соответствующие анионы (комплексы). Как уже упоминалось выше, обменная реакция может занимать от нескольких часов до нескольких дней.

В данной работе раствор, в котором проводился обмен нитрата на карбонат в  $\text{Co(2)Al-NO}_3$ , подвергался воздействию ультразвука высокой мощности с целью ускорить анионный обмен в этом СДГ.

На рисунке 3 приведены дифрактограммы СДГ  $\text{Co(2)Al-NO}_3$  до и после анионного обмена нитрата на карбонат в межслоевом пространстве.

Реакция обмена с ультразвуковым воздействием проводилась в растворе  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  и  $\text{NaOH}$  в течение 7 минут. Дифрактограмма продукта реакции полностью соответствует СДГ состава  $\text{Co(2)Al-CO}_3$  (рисунок 3, график *b*). Следует подчеркнуть, что стандартная процедура анионообменной реакции  $\text{NO}_3^- \rightarrow \text{CO}_3^{2-}$  в  $\text{Co(2)Al-NO}_3$  при постоянном перемешивании взвеси при комнатной температуре обычно занимает около 7 дней.



**Рисунок 3. – Дифрактограммы образца СДГ  $\text{Co(2)Al-NO}_3$ , полученного стандартным методом до (a) и после (b) реакции анионного обмена  $\text{NO}_3^- \rightarrow \text{CO}_3^{2-}$  с приложением ультразвука в течение 7 минут**

*Примечание.* Обозначены области наиболее интенсивных рефлексов, относящихся к фазе СДГ.

Результаты эксперимента показывают достаточно хороший практический потенциал применения ультразвука в анионообменных реакциях.

Известно, что анионный обмен в слоистых соединениях представляет собой главным образом диффузионный процесс. Очевидно, что ультразвук значительно интенсифицирует диффузию в межслоевом пространстве благодаря локальному разогреву и механическому воздействию на слоистые двойные гидроксиды.

#### **Заключение**

На примере слоистых двойных гидроксидов  $\text{Co(2)Al-NO}_3$  и  $\text{Co(2)Al-CO}_3$  показано:

- использование ультразвуковых колебаний позволяет укорить и упростить процессы при производстве СДГ и представляется весьма перспективным для практического применения. Так, на стадии кристаллизации  $\text{Co(2)Al-NO}_3$  продолжительность процесса сократилась с 4 часов до 5 минут;
- применение ультразвука на стадии анионного обмена нитрата на карбонат позволило сократить продолжительность обменной реакции с 7 дней до 7 минут.

Экспериментальная часть данной работы выполнена в Университете Авейро, Португалия.

Автор выражает признательность научному сотруднику Андрею Салаку и аспиранту Даниэлю Виейре за помощь в организации исследования.

Автор также благодарит REA ЕС за финансовую поддержку через проект H2020-MSCA-RISE-2014 “TUMOCS” (грант 645660).

#### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Evans, D.G. Structural aspects of layered double hydroxides / D.G. Evans, R.C.T. Slade // Struct. Bond. 119 (2006) 1–87.

2. Layered double hydroxides: A review / P. Nalawade [et al.] // J. Sci. Ind. Res. 68 (2009) 267–272.
3. Novel inorganic host layered double hydroxides intercalated with guest organic inhibitors for anticorrosion applications / S.K. Poznyak [et al.] // ACS Appl. Mater. Interfaces 1 (2009) 2353–2362.
4. Goh, K.H. Application of layered double hydroxides for removal of oxyanions : A review / K.H. Goh, T.T. Lim, Z. Dong // Water Research 42 (2008) 1343–1368.
5. Magnetic phenomena in Co-containing layered double hydroxides / D.E.L. Vieira [et al.] // Low Temp. Phys. 4 (2017) 1214–1218.
6. Bastami, T.R. Synthesis of manganese oxide nanocrystal by ultrasonic bath: Effect of external magnetic field / T.R. Bastami, M.H. Entezari // Ultrason. Sonochem. 19 (2012) 830–840.
7. Caruso, R.A. Sonochemical formation of colloidal platinum / R.A. Caruso, M. Ashokkumar, F. Grieser // Colloids Surfaces A: Physicochem. Eng. Asp. 16 (2000) 219–225.
8. Gold-magnetite nanocomposite materials formed via sonochemical methods / A. Pradhan [et al.] // Ultrason. Sonochem. 15 (2008) 891–897.
9. Catalytic aerobic oxidation of cycloalkanes with nanostructured amorphous metals and alloys / V. Kesavan [et al.] // Angew. Chemie Int. Ed. 38 (1999) 3521–3523.
10. Bang J.H. Applications of ultrasound to the synthesis of nanostructured materials / J.H. Bang, K.S. Suslick // Adv. Mater. 22 (2010) 1039–1059.

Поступила 06.12.2018

#### ACCELERATION OF SYNTHESIS OF FUNCTIONAL LAYERED DOUBLE HYDROXIDES UNDER ULTRASONIC TREATMENT

V. RUBANIK

*Owing to the unique anion-exchange ability, layered double hydroxides are widely used in water treatment, in vivo drug delivery, active corrosion protection, and in many other applications. The main method of the layered double hydroxides preparation is a co-precipitation from solutions of salts of the respective metals followed by crystallization and anion exchange. This procedure does not require any strict conditions but is time-consuming. In the given work, ultrasonic vibrations have been applied at different stages of preparation of a cobalt-aluminium layered double hydroxides. It has been shown that a use of ultrasound allows to accelerate considerably the processes of crystallization and anion exchange. A mechanism of impact of ultrasound on these processes has been suggested.*

**Keywords:** layered double hydroxides, anion exchange, ultrasonic treatment.

УДК 621.365.5

### КРАЕВОЙ ЭФФЕКТ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА ДЕТАЛЕЙ В ВОЗДУШНОМ ЗАЗОРЕ МАГНИТОПРОВОДА

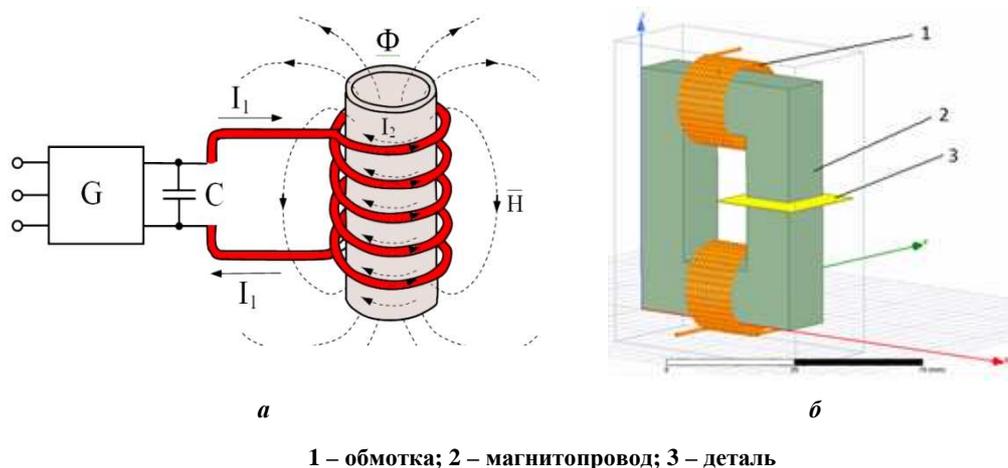
*д-р техн. наук, проф. В.Л. ЛАНИН; Ю.Н. ГРИЩЕНКО; А.Д. ХАЦКЕВИЧ*  
(Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск)

Рассмотрена задача повышения эффективности индукционного нагрева деталей в воздушном зазоре магнитопровода. Посредством моделирования в ANSYS Electromagnetics Suite 19.2 и экспериментальных исследований определены закономерности краевого эффекта в нагреваемой детали. Для обеспечения равномерности индукционного нагрева мелких деталей и сокращения времени пайки применен электрический замыкатель паяемых деталей, который с помощью прибора-регулятора образует вторичный контур с низким электрическим сопротивлением и высокой плотностью вихревых токов.

**Ключевые слова:** индукционный нагрев, зазор магнитопровода, краевой эффект, вторичный контур.

**Введение.** Индукционный нагрев деталей вихревыми токами широко применяется в серийном производстве благодаря высокой скорости, локальности зоны избирательного нагрева, использованию любой газовой среды (вакуума, защитного газа, воздуха), автоматизации процесса [1]. Наиболее часто применяют соленоидальные (кольцевые) индукторы с магнитопроводом и без него (рисунок 1, а). Выбор формы соленоида и магнитопровода зависит от геометрических размеров нагреваемых деталей, а также от их физических свойств. Индукторы соленоидального типа характеризуются значительным рассеянием магнитного потока, низким КПД (0,2...0,4), необходимостью электрической и тепловой изоляции от нагреваемых поверхностей деталей и водяного охлаждения во время работы. Источники высокочастотной энергии – ламповые генераторы мощностью 10...50 кВт – имеют значительные массогабаритные характеристики и требуют принудительного воздушного или водяного охлаждения.

Новым направлением в технике индукционного нагрева является использование магнитопровода с воздушным зазором, в который помещается нагреваемая деталь (рисунок 1, б). Этот способ реализации индукционного нагрева имеет все достоинства первого и при этом лишен его недостатков. Существенное отличие заключается в наличии магнитного сердечника (ферритового магнитопровода), который позволяет сконцентрировать электромагнитное поле индуктора в рабочем зазоре, где и происходит нагрев деталей. Рабочая обмотка охватывает магнитопровод и подключена к ВЧ-генератору. Обмотка подмагничивания служит для управления процессом нагрева. Изменяя ток подмагничивания, можно изменять магнитную проницаемость магнитопровода, а следовательно и напряженность ВЧ-поля в зазоре магнитопровода [2].



1 – обмотка; 2 – магнитопровод; 3 – деталь

Рисунок 1. – Схемы индукционного нагрева соленоидальным индуктором (а) и в воздушном зазоре магнитопровода (б)

Использование магнитопровода для концентрации электромагнитной энергии в области зазора позволяет повысить эффективность нагрева. Увеличивается скорость нагрева, зона нагрева более локализована, что важно при пайке изделий интегральной электроники. Индукционные устройства на разомкнутом магнитопроводе применяются для пайки коаксиальных кабелей к коннекторам при мощности нагрева 250 Вт и времени пайки 2,5 с, а также проводов к электронным модулям при мощности 190 Вт.

При пайке нескольких проводов к плате тепло фокусируется таким образом, что изоляция на проводах не расплавляется [3]. Однако при индукционном нагреве в зазоре магнитопровода наблюдается «краевой эффект». Под ним понимается искажение электромагнитного поля и распределения источников теплоты в зоне концов нагреваемого тела (краевой эффект детали) или обмотки (краевой эффект индуктора). Сюда же относится искажение поля в зоне резкого изменения свойств нагреваемого тела, в частности на стыке ферромагнитной и немагнитной заготовок. Краевые эффекты индуктора и детали во многом определяют качество нагрева и энергетические характеристики устройств индукционного нагрева.

Цель представляемой работы – оптимизация параметров индукционного нагрева деталей в воздушном зазоре магнитопровода при пайке деталей и электронных компонентов в процессе сборки электронных модулей.

**Моделирование параметров индукционного нагрева.** Переменный магнитный поток, пронизывающий материал сердечника, вызывает появление в проводящем материале детали ЭДС индукции. Под действием ЭДС в детали возникают вихревые электрические токи, протекающие по замкнутым контурам, расположенным в плоскостях, перпендикулярных направлению магнитного потока. Вихревые токи создают свой магнитный поток, стремящийся в соответствии с правилом Ленца ослабить изменение основного потока. Вследствие этого они действуют размагничивающим образом, уменьшая основной поток [4].

Размагничивающее действие вихревых токов неодинаково в различных частях детали. Наиболее сильно оно выражено в центре сечения, так как центральные части охватываются максимальным числом контуров тока, магнитное поле которых и создают размагничивающий поток. Поэтому в центре сечения плотность основного магнитного потока будет меньше, чем на краях, т.е. происходит вытеснение основного магнитного потока в наружные слои детали. Это явление выражено тем резче, чем выше частота магнитного потока и больше сечение, магнитная проницаемость и удельная проводимость материала детали [5].

Моделирование распределения плотности вихревых токов в детали проводилось в пакете ANSYS Electromagnetics Suite 19.2. Для моделирования построена геометрическая модель устройства индукционного нагрева на магнитопроводе.

Моделирование процесса индукционного нагрева показало наличие неравномерности распределения вихревых токов в металлической детали (рисунок 2). Максимальная по модулю плотность токов (до  $5,6 \cdot 10^9$  А/м<sup>2</sup>) на частоте 66 кГц отмечена по краям детали, а минимальная ( $8,6 \cdot 10^6$  А/м<sup>2</sup>) – в центре зазора магнитопровода.

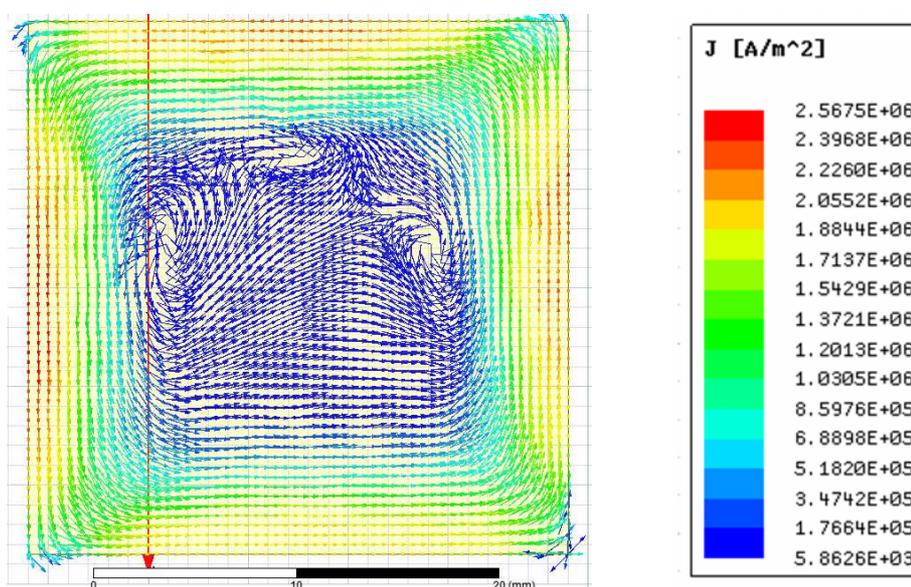


Рисунок 2. – Распределение плотности вихревых токов в детали на частоте 66 кГц

Моделирование электромагнитного поля в зазоре магнитопровода в САПР COMSOL Multiphysics для индукционного нагрева деталей из медных сплавов на частоте 66 кГц и силе тока 10А показало наличие нелинейной зависимости глубины прогрева от величины зазора (рисунок 3).

Замечено, что 90% энергии электромагнитного поля выделяется на расстоянии 2 мм от края детали. С ростом зазора мощность нагрева падает, но при этом увеличивается нагрев по остальному объему детали.

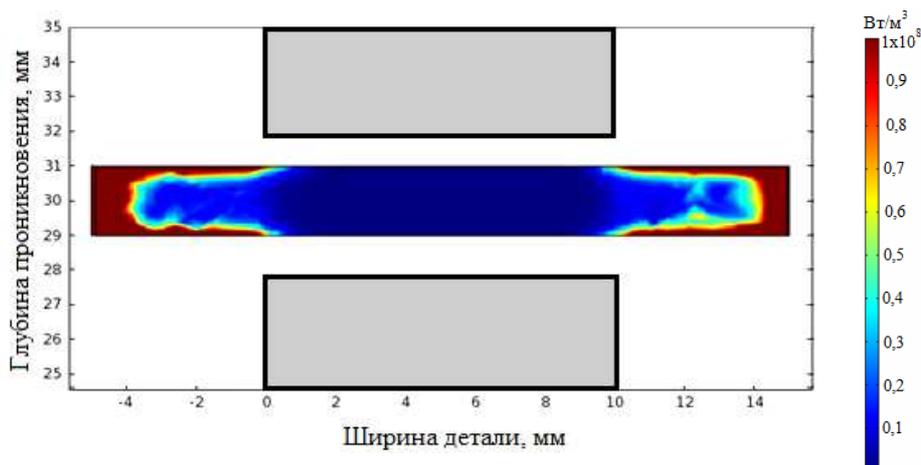
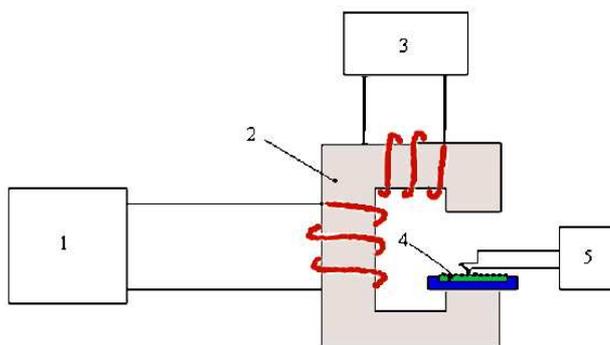


Рисунок 3. – Распределение удельной мощности нагрева ( $\text{Вт}/\text{м}^3$ ) по глубине и вдоль детали

**Экспериментальные исследования.** Индукционное устройство для формирования контактных соединений легкоплавкими припоями содержало П-образный магнитопровод из феррита марки 600 НН с незамкнутой магнитной цепью и две обмотки.

Индуктирующая обмотка подключалась к ВЧ-генератору 1 (рисунок 4). Параметры ВЧ-напряжения контролировали вольтметром В7-73/1 и частотомером ЧЗ-67. Температуру в рабочей зоне измеряли с помощью термопары ХК, прикрепленной к детали 4 и цифрового измерителя температуры ТРМ-205 5. Напряженность магнитного поля в зазоре магнитопровода 2 оценивали по величине ЭДС в измерительной рамке вольтметром типа В7-73/1. Для изменения магнитной проницаемости сердечника в дополнительную обмотку подавали постоянный или переменный ток подмагничивания величиной 1...5 А от источника 3 [4].



1 – генератор; 2 – магнитопровод; 3 – источник тока;  
4 – детали; 5 – измеритель температуры

Рисунок 4. – Схема индукционного нагрева в зазоре магнитопровода

Величина напряженности магнитного поля рассчитывалась следующим образом:

$$H = U_m / \mu_0 (4,44 \cdot S \cdot f \cdot w), \quad (1)$$

где  $U_m$  – амплитуда напряжения на рамке;  $\mu_0$  – абсолютная магнитная проницаемость;  $S$  – площадь рамки;  $f$  – частота тока;  $w$  – число витков рамки.

Для практических расчетов выражение (1) приведено к более удобному виду:

$$H = 1,26 \cdot \frac{U(B)}{f(\text{МГц}) \cdot S}. \quad (2)$$

Экспериментально измерение напряженности магнитного поля проводилось рамкой из медного провода диаметром 0,8 мм, помещенной в воздушный зазор магнитопровода и подключенной к электронному вольтметру. В измерительной рамке наводилась ЭДС, которая затем пересчитывалась в напря-

женность поля. При частоте нагрева 66 кГц напряженность магнитного поля составила  $4,5 \cdot 10^5$  А/м<sup>2</sup>, а неоднородность поля – 1,3...1,4 относительно центра детали (рисунок 5).

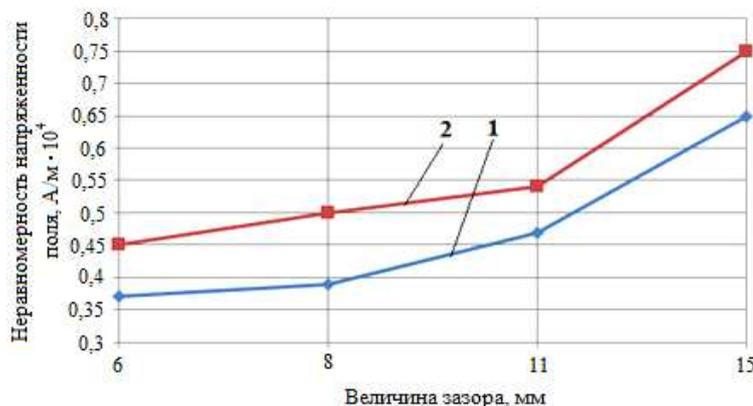


Рисунок 5. – Зависимости изменения напряженности относительно центра от величины зазора на частоте 66 кГц (1), на частоте 22 кГц (2)

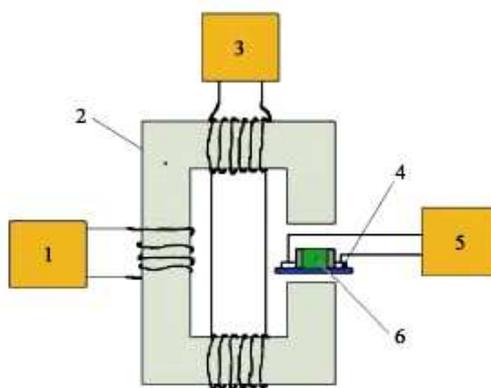
В результате краевого эффекта на краях детали, подвергаемой индукционному нагреву в воздушном зазоре магнитопровода, возникает разность потенциалов (таблица), которая зависит от мощности нагрева и от удельного сопротивления материала детали.

Таблица. – Величина разности потенциалов на краях детали при индукционном нагреве

Мощность нагрева, кВт	Разность потенциалов на краях латуновой детали, В	Разность потенциалов на краях стальной детали, В
2,6	1,02	0,85
2,5	0,82	0,80
2,0	0,65	0,64
1,5	0,57	0,51
1,0	0,53	0,46

Для повышения эффективности индукционного нагрева деталей и компонентов в воздушном зазоре магнитопровода индуктора, сокращения времени пайки и снижения нагрева электронных компонентов в устройство индукционного введено электрический замыкатель тока, выполненный в форме пластины из проводящего материала, которая с помощью прибора-регулятора образует вторичный контур с низким электрическим сопротивлением и высокой плотностью вихревых токов. Это позволило регулировать величину плотности вихревых токов, протекающих через детали, устранить потери магнитного потока в окружающем пространстве и повысить эффективность индукционного нагрева.

На рисунке 6 представлена схема устройства индукционного нагрева при пайке.



1 – источник тока; 2 – магнитопровод; 3 – генератор;  
4 – электрический замыкатель; 5 – прибор-регулятор; 6 – паяемая деталь

Рисунок 6. – Устройство индукционного нагрева при пайке

Устройство состоит из генератора 1, магнитопровода с разомкнутой магнитной цепью 2 с индукционной обмоткой, разделенной на две равные части, подключенные к генератору 1, обмотки подмагничивания, подключенной к источнику тока подмагничивания 3, паяемых деталей 4, электрического замыкателя 5, выполненного в форме пластин из проводящего материала, и прибора-регулятора 6. С помощью электрического замыкателя 5 и прибора-регулятора 6 электрически соединяли паяемые детали 4, образуя в магнитном поле магнитопровода вторичный контур с низким электрическим сопротивлением. Прибором-регулятором 6 изменяли величину вихревых токов во вторичном контуре и тем самым скорость нагрева деталей. Повышение эффективности индукционного нагрева достигается за счет образования с помощью электрического замыкателя паяемых деталей и прибора-регулятора вторичного контура с низким электрическим сопротивлением, в котором создается повышенная плотность вихревых токов, что позволяет увеличить скорость и равномерность нагрева паяемых деталей и обеспечить тем самым высокое качество паяных соединений.

Индукционное устройство на магнитопроводе из феррита марки 600 НН, питаемое от генератора с частотой 66 кГц и мощностью 1,5 кВт, применено при пайке силовых контактов электронного модуля с помощью припойной пасты ПП-250. В образованном замкнутом вторичном контуре из паяемых контактов и электрического замыкателя величина вихревых токов регулировалась прибором в пределах 6...10 А. Скорость индукционного нагрева возросла в 2 раза и составила 50 °С/с.

**Выводы.** Учёт краевого эффекта индукционного нагрева при нагреве деталей в воздушном зазоре магнитопровода позволяет более точно установить оптимальный температурный профиль нагрева и тем самым обеспечить равномерность нагрева деталей малых размеров в процессах пайки или термообработки.

Для повышения эффективности индукционного нагрева мелких деталей в воздушном зазоре магнитопровода индуктора и сокращения времени пайки в устройство индукционного нагрева введен электрический замыкатель паяемых деталей, который с помощью прибора-регулятора образует вторичный контур с низким электрическим сопротивлением и высокой плотностью вихревых токов. Это позволяет регулировать величину плотности вихревых токов, протекающих через детали, устранить потери магнитного потока в окружающем пространстве и повысить эффективность индукционного нагрева.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Induction Heating. Industrial Applications / Ed. by S. Lupi. – Paris, U.I.E., 1992. – 142 p.
2. Румак, Н.В. Экономичный бесконтактный нагрев энергией переменного магнитного поля / Н.В. Румак, В.Л. Ланин, И.Н. Чернышев // Весці АН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 1994. – № 2. – С. 94–96.
3. Kyle, C. Embedded High-Power-Density Heating / C. Kyle // Industrial Heating. – 2008. – № 9. – Р. 88–90.
4. Васильев, А.С. Моделирование вихревых токов при индукционном нагреве в зазоре магнитопровода / А.С. Васильев, В.Л. Ланин // Приборостроение 2016 : материалы 9-й междунар. науч.-техн. конф. – Минск : БНТУ. – 2016. – С. 282–283.
5. Немков, В.С. Теория и расчет устройств индукционного нагрева / В.С. Немков, В.Б. Демидович. – Л. : Энергоатомиздат, 1988. – 142 с.
6. Устройство индукционного нагрева при пайке : пат. ВУ 9156 / В.Л. Ланин. – Опубл. 01.02. 2013.

Поступила 14.02.2019

#### EDGE EFFECTS OF INDUCTION HEATING OF PARTS IN AIR GAP OF MAGNETIC CIRCUIT

V. LANIN, Y. GRISHCHENKO, A. HATSKEVICH

*The problem of increasing the efficiency of induction heating of parts in air gap of the magnetic circuit is considered. Through modeling in ANSYS Electromagnetics Suite 19.2 and experimental studies identified patterns of edge effect in the heated parts. To ensure the uniformity of induction heating of small parts and reduce the soldering time, the electrical switch of soldered parts is used, which with the help of device controller forms a secondary circuit with low electrical resistance and high density of eddy currents.*

**Keywords:** induction heating, magnetic circuit gap, boundary effect, secondary circuit.

УДК 621.793

**ОСОБЕННОСТИ ФРИКЦИОННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ХРОМОВЫХ ПОКРЫТИЙ С РЕЗИНОВЫМ КОНТРЕЛОМ В УСЛОВИЯХ ГРАНИЧНОГО ТРЕНИЯ**

*канд. техн. наук М.А. ЛЕВАНЦЕВИЧ; Е.В. ПИЛИПЧУК*  
(Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, Минск);  
*В.Н. КАЛАЧ*  
(Минский завод автоматических линий им. П.М. Машерова);  
*канд. техн. наук, доц. А.В. ДУДАН*  
(Полоцкий государственный университет)

*Демонстрируются результаты исследований триботехнических характеристик хромовых покрытий, сформированных методом электродеформационного плакирования гибким инструментом, выполненных с целью оценки перспектив их применения в качестве альтернативы гальваническому хромированию, широко используемому при изготовлении штоков гидроцилиндров металлорежущих станков. В качестве гибкого инструмента использовались вращающиеся металлические щетки с проволочным ворсом из нержавеющей стали 03X17H14M2. По результатам исследований установлено, что в условиях «граничного трения» спаренных образцов «диск с покрытием – резиновый ролик» наименьшими значениями величин коэффициента трения скольжения обладают хромовые покрытия, сформированные указанным методом, которые ниже, чем у хромовых покрытий, полученных гальваническим осаждением. Эффект снижения трения объясняется наличием на их поверхности развитого микрорельефа, состоящего из сглаженных микровыступов и микроуглублений, которые способствуют лучшему удержанию смазочного материала и повышению гидроемкости поверхностного слоя.*

**Ключевые слова:** *хромовые покрытия, электродеформационное плакирование, гибкий инструмент, материал-донор, контртело, алмазнографитная шихта, триботехнические характеристики.*

**Введение.** Гидроцилиндры возвратно-поступательного движения, использующие в качестве герметизирующих элементов манжетные резиновые уплотнения, получили широкое применение в различных типах гидроприводов металлорежущих станков [1; 2]. Для обеспечения надежной герметизации (уплотнения) соединения «шток – резиновая манжета», а также высокой износо- и коррозионной стойкости поверхность штока в подобных гидроцилиндрах подвергают гальваническому хромированию с осаждением слоя твердого хрома толщиной 20...25 мкм [3]. Однако технологии гальванического хромирования являются экологически вредными и достаточно энергоемкими [4], в связи с чем, например, в условиях мелкосерийного и индивидуального производства при необходимости осаждения хромовых покрытий на разнообразных по номенклатуре и небольших партиях деталей становятся совершенно нерентабельными. Поэтому возникает острая потребность в изыскании новых, сравнительно недорогих, способов формирования хромовых покрытий в качестве альтернативы гальваническому хромированию.

Стоит отметить, что к настоящему времени известны положительные примеры применения технологий гиперзвуковой металлизации [5], газотермического и плазменного напыления [6; 7], электроискрового и лазерного легирования [8; 9] как альтернативы гальваническому хромированию. Однако высокая стоимость используемого технологического оборудования и расходных материалов, а также необходимость привлечения высококвалифицированных специалистов для его обслуживания сдерживают их широкое промышленное применение.

В последние годы получила развитие сравнительно недорогостоящая, малоэнергоемкая и экологически чистая технология, основанная на применении метода электродеформационного плакирования гибким инструментом (ЭДПГИ), где слой покрытия на поверхности детали формируется за счет переноса ворсом вращающейся металлической щетки (ВМЩ) частичек материала покрытия (донора), а с целью интенсификации процесса плакирования на ворс ВМЩ донор подают электрическое напряжение [10; 11]. Установлено, что хромовые покрытия, сформированные с использованием технологии ЭДПГИ из доноров, полученных путем спекания смеси порошков чистого хрома и наноразмерной алмазнографитной шихты УДАГ (ТУ РБ 28619110.001-95) производства фирмы «Синта» (Беларусь), в условиях «сухого» трения с резиновым контробразцом имеют триботехнические характеристики, сопоставимые с гальваническими хромовыми покрытиями, что создает хорошие предпосылки для их практического применения [11]. Однако поведение подобных покрытий в условиях «граничного» (смешанного) трения, характерного для большинства сопряжений «шток – резиновая манжета» [12], осталось неизученным, что обусловило необходимость проведения дополнительных исследований.

Цель работы заключалась в сравнительной оценке триботехнических характеристик хромовых покрытий, сформированных с использованием технологий гальванического осаждения и ЭДПГИ в условиях «граничного» трения.

**Методика исследований.** Для проведения триботехнических испытаний использовали образцы в виде дисков из стали 40Х, диаметром 70 и толщиной 5 мм, подвергнутые объемной закалке до твердости 50 HRC и последующей шлифовке до  $R_a = 0,2 \dots 0,3$  мкм. В качестве контрообразцов использовались цилиндрические ролики диаметром 6 и длиной 12 мм, изготовленные из маслостойкой резины с модулем упругости 15 МПа.

На плоских поверхностях дисков методами гальванического осаждения и ЭДПГИ формировали хромовые покрытия. Электролитическое хромирование с осаждением слоя твердого ( $HV_{0,2} = 990 \dots 1200$ ) хрома толщиной 30...35 мкм выполнялось по типовой технологии, применяемой в ЗАО «Синта». В качестве материала-донора при ЭДПГИ использовали компактированный брусок, полученный путем спекания смеси порошков чистого хрома и наноразмерной алмазнографитной шихты УДАГ (ТУ РБ 28619110.001-95) с соотношением алмазной и неалмазной форм углерода 25:75, производства фирмы «Синта» в количестве не более 1 мас. %.

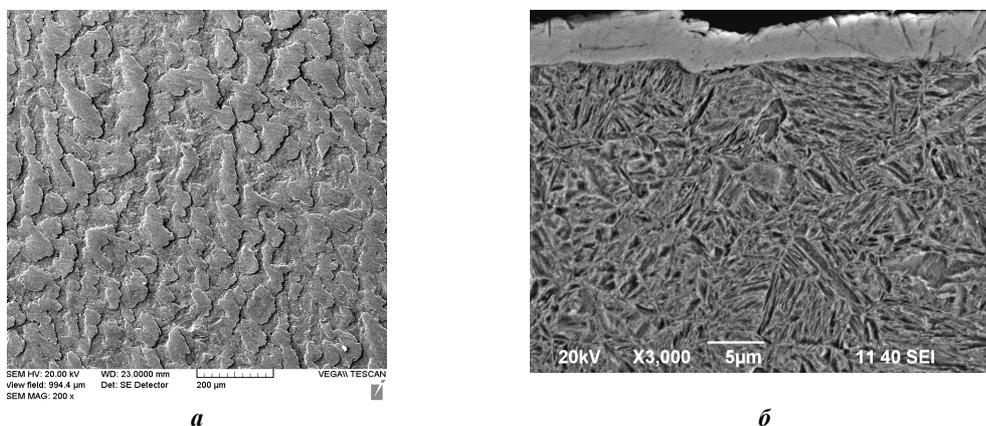
Электродеформационное плакирование гибким инструментом выполняли вращающейся цилиндрической щеткой размером 200×20×22 мм, с длиной и диаметром проволочного ворса соответственно 55 и 0,25 мм. Технологические режимы ЭДПГИ: линейная скорость вращения щетки – 30 м/с; натяг – 2 мм; число проходов щетки – 8; частота вращения диска – 7,3 мин<sup>-1</sup>. Величина подаваемого напряжения составляла 40 В; сила тока – 140 А. Толщина слоя хромовых покрытий, сформированных способом ЭДПГИ, не превышала 5...7 мкм, микротвердость –  $HV_{0,2} = 612 \dots 634$ .

Испытания на трение и износ проводили на машине трения одностороннего вращения, реализующей трение торцевой поверхности резинового ролика (контрообразца) по плоской поверхности диска с покрытием при следующих условиях: скорость вращения диска с покрытием – 834 мин<sup>-1</sup>; относительная скорость скольжения ролика по диску – 2,4 м/с; удельная нагрузка в зоне контакта торца ролика с поверхностью диска – 0,5 МПа; продолжительность испытаний каждой пары трения составляла 120 мин, что соответствовало пути трения 17280 м. В ходе триботехнических испытаний воспроизводился режим, приближенный к режиму «граничного» трения, т.е. к режиму трения с ограниченной подачей смазочного материала. В связи с этим смазывание дорожки трения на диске осуществлялось фитилем, пропитываемым капельным способом (12 капель в минуту) гидравлическим маслом М10Г2.

Регистрацию момента силы трения скольжения, который затем пересчитывался в коэффициент трения скольжения ( $f_{mp}$ ), проводили на протяжении всего цикла испытаний каждой пары трения. Износ  $\Delta m$  роликов и дисков оценивали по величине убыли их массы, определяемой по разности масс до испытаний и после испытаний, путем взвешивания на аналитических весах ВЛР-200 с точностью до 0,00001 г.

Для повышения достоверности результатов исследований испытано по три пары спаренных образцов с каждым видом покрытия. При этом три диска с гальваническим хромовым покрытием подвергали последующему шлифованию; три – шлифованию, затем полированию; соответственно три диска с хромовыми покрытиями, сформированными методом ЭДПГИ, подвергались только полированию и три – использовались в исходном состоянии, т.е. без последующего шлифования и полирования.

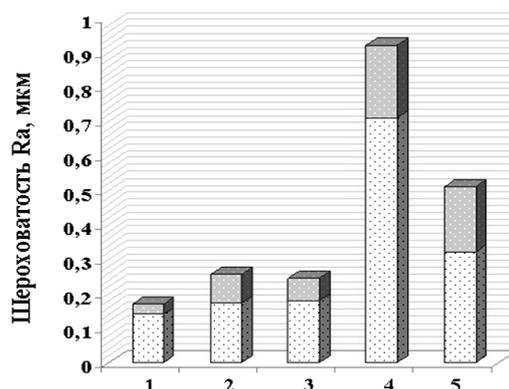
**Экспериментальные результаты и их обсуждение.** Изучение морфологии поверхности хромовых покрытий, сформированных методом ЭДПГИ, показало, что рельеф поверхности покрытия имеет развитую шероховатую структуру (рисунок 1, а), состоящую из плотно уложенных и вытянутых в направлении вращения щетки различных по размерам микрочастиц хрома, а также сглаженных микровыступов и микроуглублений. Дефекты покрытия в виде несплошностей и отслоений отсутствуют. Между слоем хромового покрытия и основой наблюдается граница раздела без видимых признаков наличия промежуточного слоя (рисунок 1, б).



**Рисунок 1. – Фотоснимок рельефа поверхности (а) и микроструктуры образца из стали 45 с хромовым покрытием, сформированным методом ЭДПГИ (б)**

Анализ результатов измерений шероховатости поверхности экспериментальных образцов дисков без покрытия и с хромовыми покрытиями, сформированными гальваническим осаждением и методом ЭДПГИ, показал, что для гальванических хромовых покрытий последующее после шлифования полирование незначительно влияет на снижение как разброса значений, так и общего уровня шероховатости поверхности (рисунок 2, столбцы 2, 3). Для этих покрытий полировка способствовала снижению параметра шероховатости поверхности  $R_a$  в среднем на 6%.

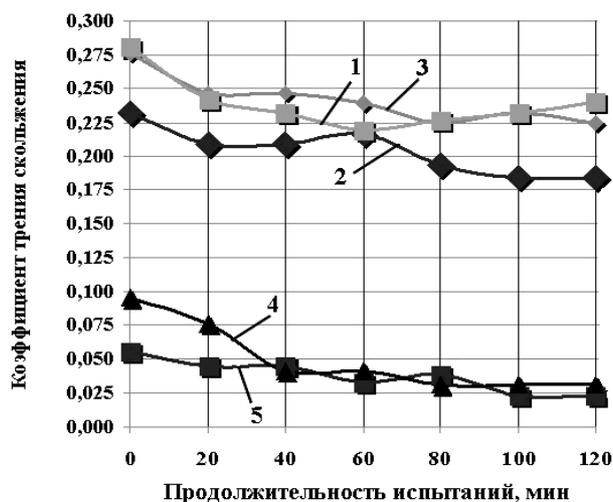
У дисков с плакированными хромовыми покрытиями шероховатость поверхности как по общему уровню, так и по разбросу значений величин параметра  $R_a$  значительно выше, чем у гальванических хромовых покрытий (рисунок 2, столбцы 4, 5). При этом, хотя последующая полировка плакированных хромовых покрытий и снижает параметр шероховатости поверхности  $R_a$  с 0,71...0,92 до 0,32...0,51 мкм, тем не менее он выше, чем у гальванических неполированных хромовых покрытий ( $R_a$  0,18...0,26 мкм).



- 1 – без покрытия; 2 – с гальваническим хромовым покрытием после шлифования;  
 3 – с гальваническим хромовым покрытием после шлифования и последующего полирования;  
 4 – с хромовым покрытием, сформированным ЭДПГИ в исходном состоянии;  
 5 – с хромовым покрытием, сформированным ЭДПГИ с последующим полированием

Рисунок 2. – Диаграмма общего уровня и разброса значений величин параметра шероховатости поверхности  $R_a$  экспериментальных образцов дисков с хромовыми покрытиями

Однако несмотря на худшие показатели шероховатости установлено, что пары трения с образцами с неполированными и полированными плакированными хромовыми покрытиями, сформированными методом ЭДПГИ, обладают наименьшими значениями величин коэффициента трения скольжения (рисунок 3, кривые 4, 5), нежели пары с образцами с гальваническими неполированными и полированными покрытиями (рисунок 3, кривые 2, 3), а также пары без покрытия (рисунок 3, кривая 1).



- 1 – без покрытия; 2 – с гальваническим хромовым покрытием после шлифования;  
 3 – с гальваническим хромовым покрытием после шлифования и последующего полирования;  
 4 – с хромовым покрытием, сформированным ЭДПГИ в исходном состоянии;  
 5 – с хромовым покрытием, сформированным ЭДПГИ с последующим полированием

Рисунок 3. – Зависимости коэффициента трения скольжения для пар трения с образцами с хромовыми покрытиями от продолжительности испытаний

Кроме того, установлено, что коэффициент трения скольжения у пар с образцами с плакированными полированными хромовыми покрытиями в начальный и заключительный периоды испытаний оказался соответственно, в 4,5 и 7,5 раза меньше, нежели у образцов с гальваническими неполированными хромовыми покрытиями (рисунок 3, кривая 2).

Как видно из представленных на рисунке 3 зависимостей, значения величин коэффициента трения скольжения для всех испытываемых пар трения на протяжении 80 мин цикла испытаний имеют тенденцию к снижению. При этом коэффициент трения скольжения для пар трения с образцами без покрытия и с гальваническими неполированными и полированными хромовыми покрытиями уменьшается относительно первоначальных значений в среднем в 1,2...1,24 раза (рисунок 3, кривые 1, 2, 3), а для пар с образцами с плакированными неполированными и полированными хромовыми покрытиями – в 3,1 и 1,4 раза, соответственно (рисунок 3, кривые 4, 5). Далее наблюдается стабилизация процесса трения у всех испытываемых пар с образцами с хромовыми покрытиями, кроме пар с образцами без покрытия, где заметно возрастание величины коэффициента трения скольжения (рисунок 3, кривая 1). К концу цикла испытаний среднее значение величины коэффициента трения скольжения для трущихся пар составляло: 0,24 – для образцов без покрытия; 0,185 – для образцов с гальваническими неполированными покрытиями; 0,224 – для образцов с гальваническими полированными покрытиями; 0,031 и 0,023 – для образцов с плакированными неполированными и полированными покрытиями соответственно.

Таким образом, можно предположить, что снижению значений величин коэффициента трения скольжения у пар с образцами с плакированными хромовыми покрытиями способствует развитый микрорельеф их поверхности, характеризующийся наличием сглаженных микровыступов и микроуглублений, микрокарманов, (см. рисунок 1, а). Подобные микрокарманы, сформированные, например, виброударной [13] или эрозионно-струйной обработкой [14], обладают способностью повышать гидроемкость поверхностного слоя, лучше удерживают смазочный материал и в процессе фрикционного взаимодействия с контртелом обеспечивают возможность возникновения гидродинамического эффекта в зоне контакта. К числу их положительных свойств относят также и то, что при преднамеренном формировании на поверхности, например, штока гидроцилиндра, они способствуют снижению усилия страгивания штока в случае его длительной выдержки в неподвижном состоянии под нагрузкой благодаря способности сохранения смазочной пленки на трущейся поверхности.

Для проверки сделанного предположения проведены дополнительные исследования по оценке гидроемкости слоев хромовых покрытий, сформированных с использованием обеих технологий. При этом оценку гидроемкости проводили на цилиндрических образцах из стали 45 (45...48 HRC) диаметром 15 и длиной 32 мм, с исходной шероховатостью поверхности по параметру  $R_a = 0,2...0,25$  мкм. Технологические режимы формирования хромовых покрытий были идентичны, что и для дисков, используемых для триботехнических испытаний. После нанесения хромовых покрытий образцы подвергались промывке в ацетоне, протирке и сушке в сушильном шкафу при температуре 60 °С в течение 20 минут, после чего остывшие до комнатной температуры (22...24 °С) образцы взвешивались на аналитических весах ВЛР-200 с точностью до 0,00001 г. Затем образцы погружались в ванну с гидравлическим маслом М10Г2 и после выдержки в течение 10 минут извлекались и подвешивались в вертикальном положении в течение 30 минут для естественного стекания масла, и снова взвешивались.

Для повышения достоверности результатов испытаний всего было испытано по три образца без покрытия и с каждым видом хромовых покрытий, сформированных по обеим технологиям.

При оценке гидроемкости образцов с покрытием предварительно определялась гидроемкость образцов без покрытия по формуле:

$$\mu_{\sigma} = \frac{m_{2\sigma} - m_{1\sigma}}{2 \cdot S_{1\sigma} + S_{2\sigma}},$$

где  $m_{1\sigma}$  – масса образца без покрытия до окунания в масло;  $m_{2\sigma}$  – масса образца без покрытия после окунания в масло;  $S_{1\sigma}$  – площадь торцевой поверхности образца;  $S_{2\sigma}$  – площадь образующей цилиндрической поверхности образца.

Далее, с учетом того, что хромовые покрытия были сформированы только на внешних цилиндрических поверхностях образцов, для исключения из расчета гидроемкости непокрытых торцевых поверхностей, гидроемкость образцов с покрытиями вычисляли по формуле:

$$\mu_{\pi} = \frac{m_{2\pi} - m_{1\pi} - 2 \cdot S_{1\pi} \cdot \mu_{\sigma}}{S_{2\pi}}.$$

Здесь  $m_{1\pi}$  – масса образца с покрытием до окунания в масло;  $m_{2\pi}$  – масса образца с покрытием после окунания в масло;  $S_{1\pi}$  – площадь торцевой поверхности образца;  $S_{2\pi}$  – площадь образующей цилиндрической поверхности образца;  $m_{\sigma}$  – маслосъемность образца без покрытия.

Анализ данных по оценке гидроемкости образцов с хромовыми покрытиями показал, что наибольшей гидроемкостью обладают образцы с неполированными и полированными хромовыми покрытиями, сформированными с использованием технологии ЭДПГИ (таблица 1). Гидроемкость образцов с плакированными полированными хромовыми покрытиями в среднем на 16% превышает аналогичное значение для образцов с гальваническими неполированными хромовыми покрытиями и на 28% для образцов без покрытия.

Таблица 1. – Гидроемкость хромовых покрытий, сформированных методами гальванического осаждения и электродеформационного плакирования гибким инструментом

№ образца	Вид покрытия	Масса образца до испытаний $m_1$ , г	Масса образца после испытаний $m_2$ , г	Изменение массы образца $\Delta m = m_2 - m_1$ , г	Гидроемкость покрытия $\mu \cdot 10^{-6}$ , г
1	Без покрытия	43,629	43,6352	0,0062	3,3308
2	Гальваническое хромовое покрытие (после шлифования)	38,0187	38,0252	0,0065	3,8897
3	Гальваническое хромовое покрытие (после шлифования и полирования)	37,0219	37,027	0,0051	2,8950
4	Плакированное хромовое покрытие (неполированное)	43,5402	43,5486	0,0084	4,7898
5	Плакированное хромовое покрытие (полированное)	42,4819	42,4901	0,0082	4,6571

По результатам исследований износа образцов установлено, что наименьший износ как дисков с покрытиями, так и резиновых контробразцов имеют пары трения с дисками с гальваническими неполированными хромовыми покрытиями, т.е. обработанных только шлифованием (рисунок 5, столбец 2).

Несколько больший износ имеют пары с плакированными полированными хромовыми покрытиями (рисунок 4, столбец 5). Для этих пар характерно то, что хотя износ дисков был сопоставим с износом дисков с гальваническими неполированными хромовыми покрытиями, износ их резиновых контробразцов оказался на  $0,3 \cdot 10^{-3}$  г выше значений величин износа контробразцов пар с гальваническими неполированными покрытиями. Возможной причиной повышенного износа контробразцов в данном случае может быть более высокая шероховатость поверхности плакированного хромового покрытия.

У остальных пар трения, подвергнутых испытаниям, значения величин износа дисков и контробразцов значительно превышали рассмотренные выше (рисунок 4, столбцы 1, 3, 4).

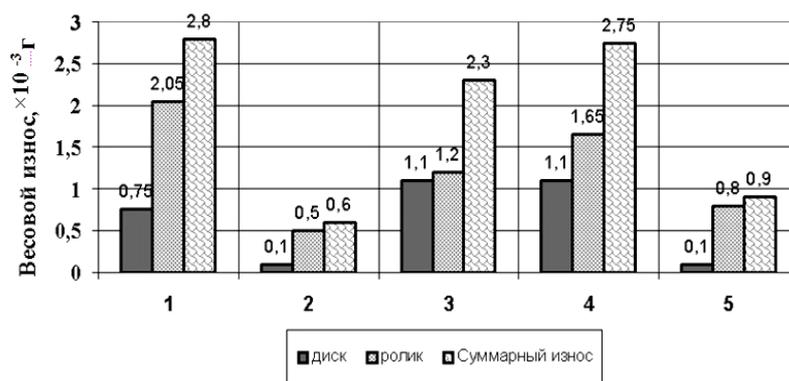


Рисунок 4. – Диаграмма значений величин износа для пар трения с образцами без покрытия (1); с гальваническим хромовым покрытием после шлифования (2); с гальваническим хромовым покрытием после шлифования и последующего полирования (3); с хромовым покрытием, сформированным ЭДПГИ в исходном состоянии (4); с хромовым покрытием, сформированным ЭДПГИ с последующим полированием (5)

**Выводы.** При формировании хромовых покрытий методом ЭДПГИ рельеф поверхности сформированного слоя покрытия имеет развитую шероховатую структуру, состоящую из плотно уложенных и вытянутых в направлении вращения щётки различных по размерам микрочастиц хрома, а также сглаженных микровыступов и микроуглублений. Дефекты покрытия в виде несплошностей и отслоений отсутствуют.

Шероховатость поверхности плакированных покрытий до полировки ( $R_a = 0,71...0,92$  мкм) и после полировки ( $R_a = 0,32...0,51$  мкм) как по общему уровню, так и по разбросу значений величин параметра  $R_a$  выше, чем у гальванических неполированных ( $R_a = 0,18...0,26$  мкм) и полированных ( $R_a = 0,17...0,24$  мкм) хромовых покрытий.

По результатам триботехнических испытаний установлено, что, несмотря на повышенную шероховатость поверхности плакированных хромовых покрытий, пары трения с образцами с неполированными и полированными плакированными хромовыми покрытиями, сформированными методом ЭДПГИ, обладают наименьшими значениями величин коэффициента трения скольжения, нежели пары, с образцами с гальваническими неполированными и полированными покрытиями, а также пары без покрытия. Среднее значение величины коэффициента трения скольжения для трущихся пар составляло: 0,24 – для образцов без покрытия; 0,185 – для образцов с гальваническими неполированными покрытиями; 0,224 – для образцов с гальваническими полированными покрытиями; 0,031 и 0,023 – для образцов с плакированными неполированными и полированными покрытиями, соответственно. Снижению значений величин коэффициента трения скольжения у пар с образцами с плакированными хромовыми покрытиями способствует развитый микрорельеф их поверхности, характеризующийся наличием сглаженных микровыступов и микроуглублений (микрокарманов), которые повышают гидроемкость поверхностного слоя на 16 и 28% по сравнению с образцами с гальваническими неполированными хромовыми покрытиями и образцами без покрытия соответственно. Подобный микрорельеф обладает способностью лучше удерживать смазочный материал и в процессе фрикционного взаимодействия с контртелом обеспечивает возможность возникновения гидродинамического эффекта в зоне контакта. Однако у пар с плакированными хромовыми покрытиями, несмотря на низкие значения величин коэффициента трения скольжения, наименьший износ резиновых контробразцов отмечен у пар с гальваническими неполированными хромовыми покрытиями, т.е. обработанных только шлифованием.

По результатам исследований износа образцов, установлено, что наименьший износ, как дисков с покрытиями, так и резиновых контробразцов, имеют пары трения с дисками с гальваническими неполированными хромовыми покрытиями. Для этих пар характерно то, что хотя износ дисков был и сопоставим с износом дисков с плакированными полированными хромовыми покрытиями, износ их резиновых контробразцов оказался на  $0,3 \cdot 10^{-3}$  г меньше значений величин износа контробразцов пар с плакированными полированными покрытиями.

Таким образом, результаты проведенных исследований позволяют заключить, что технология формирования покрытий на основе хрома методом ЭДПГИ, хотя и обладает определенными недостатками, главным из которых может оказаться повышенный износ контртел, выполненных из резины, однако в силу простоты ее реализации, малой энергоемкости и экологической чистоты вполне может быть использована в промышленности для хромирования деталей гидроприводов.

Опытно-промышленная апробация и внедрение технологии ЭДПГИ выполнены на ОАО «Минский завод автоматических линий им. П.М. Машерова». Покрытия из хрома, легированного УДАГ, сформированы методом ЭДПГИ на рабочих поверхностях штоков гидроцилиндров объемных гидроприводов гидравлического оборудования станков (рисунок 5).



**Рисунок 5. – Фотоснимок процесса формирования покрытия «хром + УДАГ» методом ЭДПГИ на рабочей поверхности штока гидроцилиндра**

Испытания штоков с покрытием «хром + УДАГ» в составе гидроцилиндров проведены на специализированном испытательном стенде в ОАО «МЗЛ им. П.М. Машерова».

В ходе испытаний установлено, что опытные гидроцилиндры полностью соответствуют предъявляемым техническим требованиям и пригодны для эксплуатации в составе гидроприводов станков.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Свешников, В.К. Станочные гидроприводы : справочник / В.К. Свешников. – М. : Машиностроение, 2004. – 512 с.
2. Гидроцилиндры : учеб.-метод. пособие / Д.Ю. Воронов [и др.]. – Тольятти : ТГУ, 2011. – 72 с.
3. Беленький, М.А. Электроосаждение металлических покрытий : справочник / М.А. Беленький, А.Ф. Иванов. – М. : Металлургия, 1985. – 288 с.
4. Фаличева, А.И. Экологические проблемы хромирования и альтернативного покрытия / А.И. Фаличева, Ю.А. Стекольников, Н.И. Глянец // Вестн. ТГУ. – 1999. – Т. 4, вып. 2. – С. 256–257.
5. Перспективы замены гальванического хромирования гиперзвуковой металлизацией / М.А. Белоцерковский [и др.] // Актуальные вопросы машиноведения : сб. науч. тр. / ОИМ НАН Беларуси ; редкол.: А.А. Дюжев [и др.]. – 2014. – Вып. 3. – С. 324–328.
6. Verstak, A. Activated Combustion HVAF Coatings for Protection against Wear and High Temperature Corrosion / A. Verstak, V. Baranovski // Proc. of the International Thermal Spray Conference 2003, Orlando, FL, USA, ASM International, Materials Park, Ohio, USA. – 2003. – P. 535–541.
7. Пилюшина, Г.А. Состояние и пути повышения работоспособности гидропривода лесозаготовительных машин / Г.А. Пилюшина, С.В. Тяпин // Автотракторостроение-2009. – М. : МГТУ «МАМИ», 2009. – Кн. 1. – С. 452–455. (Наплавка, плазменное напыление).
8. Электроискровые технологии восстановления и упрочнения деталей машин и инструментов (теория и практика) / Ф.Х. Бурмукулов [и др.]. – Саранск : Тип. Крас. Окт., 2003. – 504 с. (ЭИ Легирование).
9. Raykis, O. High-speed laser metal deposition replaces hard chrome plating / O. Raykis // Laser Technik Journal 1/2017. – С. 28–30.
10. Белевский, Л.С. Фрикционный и электрофрикционный способы нанесения покрытий / Л.С. Белевский, И.В. Белевская // Обработка сплошных и слоистых материалов. – 2012. – Вып. 38. – С. 158–163.
11. Износостойкость легированных хромовых покрытий, сформированных способом деформационного плакирования с электрическим напряжением / М.А. Леванцевич [и др.] // Актуальные вопросы машиноведения : сб. науч. тр. / Объедин. ин-т машиностроения НАН Беларуси ; редкол.: С.Н. Поддубко [и др.]. – 2017. – Вып. 6. – С. 159–162.
12. Борисов, Г.А. Технологические основы повышения ресурса штокового узла гидроцилиндра / Г.А. Борисов, Е.Е. Семенова, В.Ю. Чикунков // Вестн. РГАТУ. – 2010. – № 2. – С. 44–50.
13. Шнейдер, Ю.Г. Влияние шероховатости металлической поверхности на трение в гидроуплотнительных парах возвратно-поступательного движения / Ю.Г. Шнейдер, А.Л. Рейнус // Вестн. машиностроения. – 1970. – № 5. – С. 19–20.
14. Проволоцкий, А.Е. Технологические методы повышения долговечности деталей гидромашин / А.Е. Проволоцкий, С.П. Лапшин, С.Л. Негруб // Промислова гідравліка і пневматика : Всеукраїнський наук.-техн. журн. – Вінниця : Вінницький державний аграрний університет. – 2004. – Вып. 2(4). – С. 68–71.

Поступила 12.02.2019

## FEATURES OF FRICTION INTERACTION OF THE CHROMIUM COATINGS WITH RUBBER CONTRALOR IN CONDITIONS OF BOUNDARY FRICTION

**M. LEVANTSEVICH, E. PILIPCHUK, V. KALACH, A. DUDAN**

*Are shown the results of research of tribological characteristics of chromium coatings formed by electro-deposition cladding flexible, made-tion to assess the prospects for their use as alternatives to electroplated chrome finish-NIJ, widely used in the manufacture of rods of hydraulic cylinders machine tools. As a flexible tool used rotating metal brushes with wire thief-catfish stainless steel 03H17N14M2. According to the results of the research it was found that under the conditions of "boundary friction" of paired images "coated disc – rubber roller" the least values of the sliding friction coefficient have chrome coatings formed by the magnetic method, which are lower than the chrome coatings obtained by galvanic deposition. The effect of friction reduction is explained by the presence on their surface of a developed microrelief consisting of smoothed micro-steps and micro-depressions, which contribute to better retention of the lubricant and increase the hydro-capacity of the surface layer.*

**Keywords:** chrome coating, electrodeposition cladding, flexible tool, material donor, has contrale, almaznaya mixture, tribological characteristics.

УДК 621.923

**СПЕКАНИЕ ФЕРРОМАГНИТНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ  
НА ОСНОВЕ КАРБИДОВ БОРА И КРЕМНИЯ***канд. техн. наук, доц. С.В. ЯКУБОВСКАЯ**(Белорусский национальный технический университет, Минск);**канд. техн. наук, доц. В.Е. БАБИЧ**(Университет гражданской защиты МЧС Беларуси, Минск)*

*Представлены результаты исследования морфологии поверхности ферромагнитных композиционных материалов железо-стекло-карбид кремния (карбид бора); феррит меди-стекло-карбид кремния (карбид бора), которые позволили установить, что их структура определяется концентрацией связующего и температурой спекания. Выявлено, что в зависимости от концентрации связующего спекание шихты (брикетов) приводит к формированию композиционных материалов с различной структурой.*

**Ключевые слова:** *магнитно-абразивная обработка, абразивный материал, спекание шихты, ферромагнитные композиционные материалы.*

**Введение.** Эксплуатационные характеристики абразивных материалов адаптированы для конкретных процессов обработки. В отличие от абразивных материалов, используемых в традиционных процессах абразивной обработки (обработка свободным абразивом, обработка связанным абразивом, обработка закрепленным абразивом), абразивные материалы, применяемые в процессах магнитно-абразивной обработки, представляют собой ферромагнитные частицы, содержащие включения абразива, объединенные в сгусток-абразивный инструмент магнитным полем [1]. Ферроабразивные композиционные материалы представляют собой матрицу, в которой расположены ферромагнитные частицы и абразив. Такие материалы получают на основе сплавов железа, либо их спеков на основе железа и частиц абразива. Наиболее широко в качестве абразива в таких материалах используются карбид кремния и оксид алюминия [2; 3]. Использование в качестве абразива карбида бора и карбида кремния и более легкоплавких связующих позволит повысить абразивные характеристики композиционных материалов. Однако использование немагнитных связующих требует увеличения содержания в композиционных материалах ферромагнитных наполнителей и снижения содержания связующих. В этих условиях физико-механические и эксплуатационные характеристики ферромагнитных композиционных материалов будут зависеть от режимов их получения (спекания).

Цель представленной работы – повысить эксплуатационные характеристики композиционных магнитно-абразивных материалов за счет применения в качестве абразива карбидов бора и кремния с обоснованием режимов их спекания [2–4].

**Основная часть.** Объектом исследования являлись ферромагнитные композиционные материалы железо (феррит меди)-стекло-карбид кремния (карбид бора).

В качестве ферромагнитного наполнителя использовали феррит меди и железо; в качестве абразивов – порошки карбида бора и карбида кремния; в качестве связующего при получении ферромагнитных связок применяли легкоплавкие стекла на основе дигидрофосфатов натрия, калия, цинка. Флюсующей добавкой служил фторид натрия.

Связующее получали следующим образом: дигидрофосфаты калия, натрия, цинка и фторид натрия перемешивали в фарфоровой ступке. Затем шихту нагревали при 500 К в течение 0,5 часа. Полученную фритту стекла измельчали и отсеивали порошок фракции 50 мкм. Температура начала растекания стекла составляла 620 К. Далее связующее смешивали с ферритом меди или порошком железа. Затем в полученную шихту связующее-ферромагнитный наполнитель вводили карбид кремния. Концентрация связующего в композиционных материалах составляла 8, 15, 25 об. %. Шихту отжигали при 775, 825, 875 К; длительность спекания составляла 30 минут. Из шихты прессовали брикеты при давлении 10 МПа, которые далее отжигали при 775, 875 К.

Исследование морфологии и микроструктуры поверхности ферромагнитных композиционных материалов проводили на растровом электронном микроскопе VEGA/TESCAN.

Проведенное исследование морфологии поверхности ферромагнитных композиционных материалов железо-стекло-карбид кремния показало следующее:

- формирование пленок связующего на поверхности частиц карбида кремния и железа происходит при концентрации связующего в композиционном материале 25 об. % (рисунок 1);

- при концентрации стекла в композиционном материале 25 об. % стекло образует пленки на частицах карбида кремния и железа. Структура композиционного материала представляет собой стеклянную матрицу, в которой расположены частицы железа и карбида кремния. Концентрация стекла в композиционном материале достаточна, чтобы сформировался объемный каркас, в котором расположены частицы карбида кремния и железа (рисунок 1, а);

- снижение концентрации связующего (стекла) в композиционном материале изменяет его структуру;  
 - снижение концентрации стекала в композиционном материале до 15 об. % приводит к образованию пор, однако пленка стекла присутствует на частицах карбида кремния и железа (рисунок 1, б). Структура такого композиционного материала представляет собой каркас из частиц железа и карбида кремния, в котором присутствуют поры. Несмотря на снижение содержания стекла в композиционном материале стекло формирует пленки на поверхности частиц железа и карбида кремния. На отдельных участках композиционного материала, где концентрация стекла больше, образуются агломераты из частиц карбида кремния, железа и стекла. Структура таких агломератов подобна структуре композиционного материала с содержанием стекла 25 об. % (рисунок 1, а).

Последующее снижение содержания стекла в композиционном материале до 8 об. % приводит к формированию материала, структура которого представляет собой сгусток частиц карбида кремния и железа, слабосвязанных между собой (рисунок 1, в). Концентрация стекла в композиционном материале недостаточна для формирования сплошных пленок (оболочек) на поверхности частиц железа и кремния. Объединение частиц карбида кремния и железа в сгусток обеспечивается островковыми пленками на поверхности частиц (рисунок 1, в).



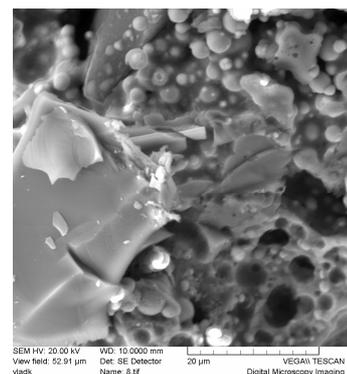
**Концентрация железа в композиционном материале, об. %: а – 50; б – 60; в – 70;**  
**концентрация стекла в композиционном материале, об. %: а – 25; б – 15; в – 5;**  
**концентрация карбида кремния в композиционном материале, об. %: а, б, в – 25**

**Рисунок 1. – Морфология поверхности композиционных материалов железо-стекло-карбид кремния  
 Температура спекания 875 К**

Согласно полученным экспериментальным данным, снижение температуры спекания от 825 до 775 К не приводит к изменению микроструктуры ферромагнитных композиционных материалов, содержащих 25 об. % стекла. Однако в композиционном материале, спеченном при 775 К, формируется структура, подобная структуре композиционного материала с содержанием 15 об. % стекла, спеченного при 875 К (рисунок 2).

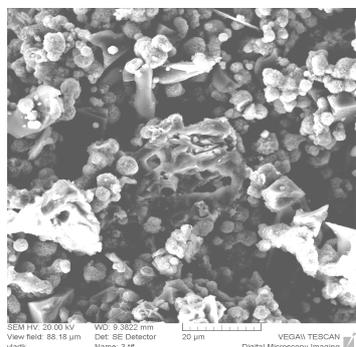
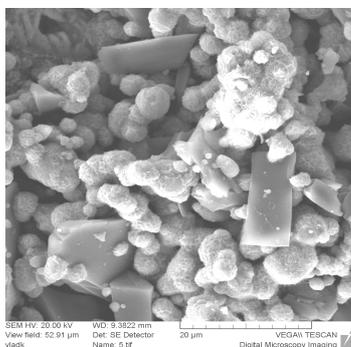
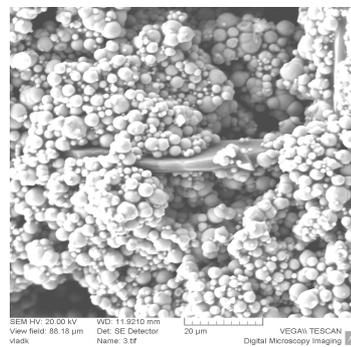
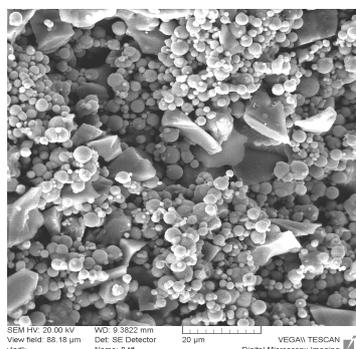
Спекание шихты при 775 и 825 К с меньшим содержанием стекла (15 и 8 об. %) приводит к формированию в композиционном материале структур, представляющих собой сгусток из частиц железа и карбида кремния, объединенных пленками стекла на поверхности частиц (рисунок 3).

Снижение температуры спекания ферромагнитных композиционных материалов, содержащих 8 и 15 об. % связующего, приводит к формированию структур, в которых частицы карбида кремния и железа связаны между собой прослойками пленок стекла на соседних частицах (см. рисунок 3). Межчастичные промежутки не заполнены стеклом. Несмотря на небольшое содержание стекла (8 и 15 об. %) в композиционном материале на частицах железа и карбида кремния присутствуют пленки стекла (рисунок 3 а, б). В структуре композиционных материалов также присутствуют агломераты, представляющие собой несколько частиц железа, карбида бора в стеклянной матрице (рисунок 3 б). Формирование таких структур в ферромагнитных композиционных материалах с содержанием стекла 8 и 15 об. %, спеченных при 775 и 875 К, показывает, что после плавления частиц стекла расплав гидроксидного стекла смачивает поверхность частиц железа и карбида кремния. При последующем повышении температуры гидроксид-



**Рисунок 2. – Микроструктура композиционного материала железо (50 об. %)–стекло (25 об. %)–карбид кремния (25 об. %) Температура спекания 775 К**

ное стекло теряет воду и превращается в оксидное стекло. Морфология поверхности частиц железа показывает, что в процессе нагрева спека происходит взаимодействие стекла, находящегося на поверхности частиц железа, с железом. Следствием этого является изменение состава стекла и повышение температуры перехода в вязкое состояние, что приводит к прекращению процесса растекания оксидного расплава на поверхности частиц и образованию участков с повышенной концентрацией стекла (агломератов).

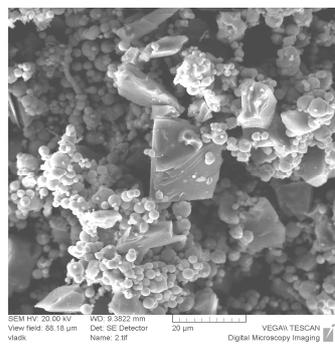
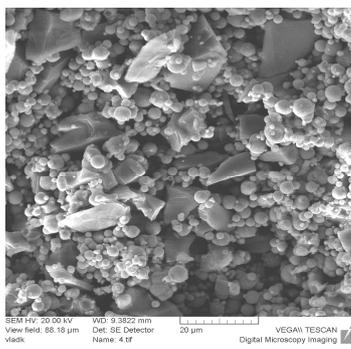
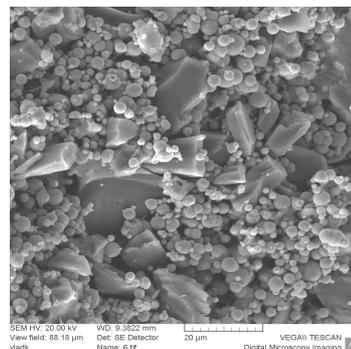
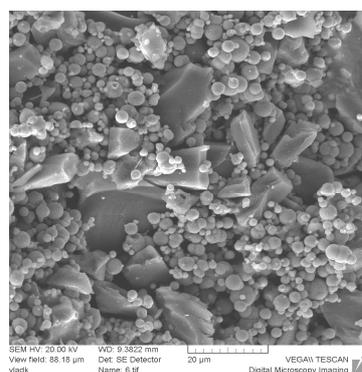
**a****б****в****z**

**Концентрация железа в композиционном материале, об. %:** *a, в* – 67; *б, z* – 60;  
**концентрация стекла в композиционном материале, об. %:** *a, в* – 8; *б, z* – 15;  
**концентрация карбида кремния в композиционном материале, об. %:**  
*a, в* – 15; *б, z* – 25

**Температура спекания, К:** *a, б* – 775; *в, z* – 825

**Рисунок 3. – Микроструктура композиционных материалов железо-стекло-карбид кремния**

Спекание брикетов из шихты не приводит к существенному изменению структуры ферромагнитных композиционных материалов железо-стекло-карбид кремния (рисунок 4).

**a****б****в****z**

**Концентрация стекла в композиционном материале, об. %:**  
*a, б* – 8; *в, z* – 15

**Температура спекания, К:** *a, в* – 775; *б, z* – 825

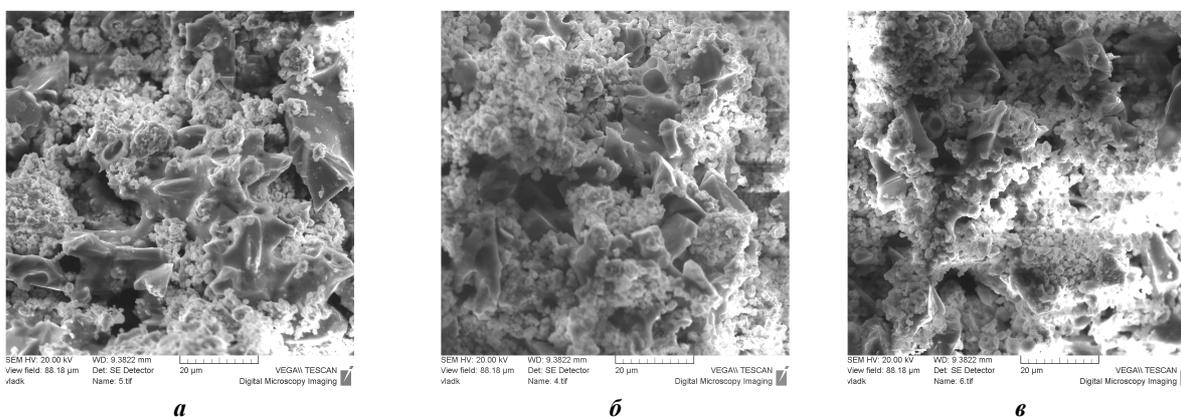
**Давление холодного прессования 10 МПа**

**Рисунок 4. – Микроструктура композиционных материалов железо-стекло-карбид кремния**

Структура композиционных материалов железо-стекло-карбид кремния, полученных спеканием брикетов, представляет собой объемный каркас из частиц карбида кремния и железа. Пленки (островковые) присутствуют как на частицах карбида кремния, так и железа (см. рисунок 4). Однако сплошная стеклянная матрица не образуется. Участки множественных стыков между частицами не заполнены стеклом (см. рисунок 4).

Согласно полученным экспериментальным данным, спекание шихты феррит меди-стекло-карбид кремния; феррит меди-стекло-карбид бора, с содержанием 8 и 15 об. % стекла не приводит к формированию композиционных материалов. После спекания шихты при 775 К, 825 и 875 К образуются спеки из слабосвязанных между собой частиц. Увеличение концентрации стекла в шихте до 25 об. % приводит к образованию композиционных материалов (рисунок 5).

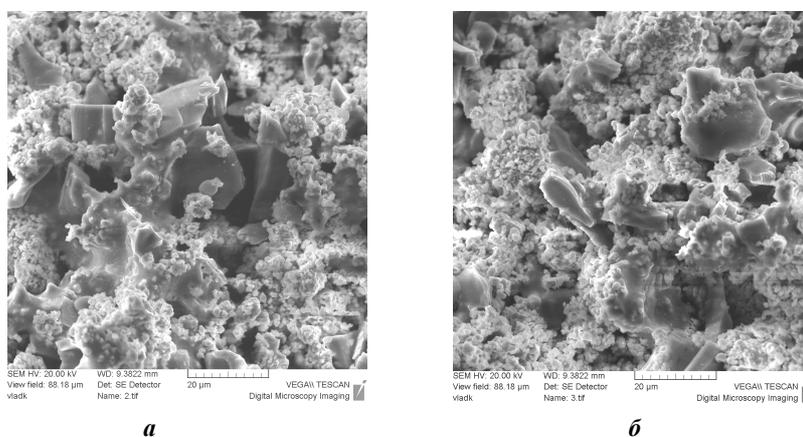
Структура композиционных материалов феррит меди-стекло-карбид кремния при содержании стекла 25 об. % зависит от температуры спекания). При температуре спекания 875 К в структуре композиционного материала присутствуют частицы стекла (рисунок 5, *а*). Пленки стекла присутствуют как на частицах карбида кремния, так и на частицах феррита меди. Снижение температуры спекания приводит к формированию композиционных материалов с более однородным распределением стекла (рисунок 5, *б*, *в*). Однако в структуре композиционных материалов присутствуют участки с большей концентрацией стекла, чем на соседних участках (рисунок 5, *б*).



Температура спекания, К: *а* – 875; *б* – 825; *в* – 775.

Рисунок 5. – Микроструктура композиционных материалов: феррит меди (50 об. %)–стекло (25 об. %)–карбид кремния (25 об. %)

Спекание брикетов из шихты феррит меди-стекло-карбид кремния не приводит к существенному изменению структуры композиционных материалов (рисунок 6). В структуре композиционных материалов, полученных спеканием брикетов, как и в структуре композиционных материалов, полученных спеканием шихты, присутствуют частицы стекла (рисунок 6, *а*).



Температура спекания, К: *а* – 875; *б* – 775

Давление горячего прессования 10 МПа

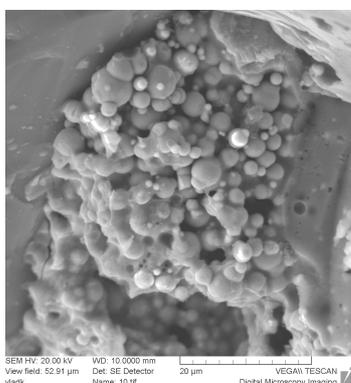
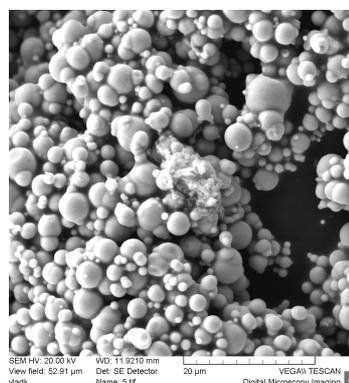
Рисунок 6. – Микроструктура композиционных материалов феррит меди-стекло-карбид кремния

Микроструктура композиционных материалов феррит меди-стекло-карбид кремния, полученных спеканием шихты и брикетов, свидетельствует о том, что стекло смачивает частицы феррита меди (см. рисунки 5, 6). Смачивание частиц феррита меди расплавом гидроксидного, а затем оксидного стекла приводит к образованию материала, структура которого представляет собой матрицу из стекла с расположенными в ней частицами феррита меди.

Концентрация стекла 25 об. % в композиционном материале достаточна для образования объемной пленки стекла, окружающей как частицы феррита меди, так и частицы карбида кремния (см. рисунки 5, 6). В результате этого образуется композиционный материал, структура которого представляет матрицу из частиц феррита меди (меньших по размеру, чем частицы карбида кремния) и прослоек стекла между ними, в которой расположены частицы карбида кремния (см. рисунки 5, 6).

Меньшие, чем размеры частиц железа, размеры частиц феррита меди приводят к тому, что снижение концентрации стекла до 15 и 8 об. % не вызывает полное смачивание поверхности частиц феррита меди и объединение их в матричный материал. Присутствие пор в агломератах феррита меди свидетельствует о сильной зависимости структуры композиционного материала феррит меди-стекло-карбид кремния от концентрации стекла, обусловленной взаимодействием стекла с ферритом меди (см. рисунки 5, б; 6, б).

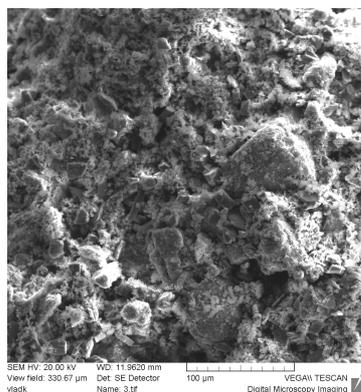
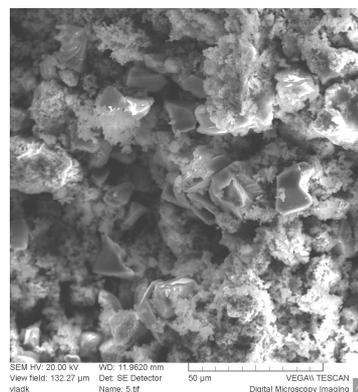
При спекании композиционных материалов железо-стекло-карбид бора и феррит меди-стекло-карбид бора отмечаются аналогичные зависимости изменения микроструктуры композиционных материалов, что и при спекании композиционных материалов с карбидом кремния (рисунки 7, 8).

*a**б*

**Концентрация железа в композиционном материале, об. %:  $a - 50$ ;  $б - 67$ ;  
концентрация стекла в композиционном материале, об. %:  $a - 25$ ;  $б - 8$ ;  
концентрация карбида бора в композиционном материале, об. %:  $a$ ;  $б - 25$**

**Температура спекания 875 К**

**Рисунок 7. – Микроструктура композиционных материалов железо-стекло-карбид бора**

*a**б*

**Концентрация феррита меди в композиционном материале, об. %:  $a - 50$ ;  $б - 67$ ;  
концентрация стекла в композиционном материале, об. %:  $a - 25$ ;  $б - 8$ ;  
концентрация карбида бора в композиционном материале, об. %:  $a$ ,  $б - 25$**

**Температура спекания 875 К**

**Рисунок 8. – Микроструктура композиционных материалов феррит меди-стекло-карбид бора**

Снижение содержания связующего от 25 до 8 об. % в композиционном материале феррит меди-стекло-карбид бора, несмотря на образование пленок стекла на частицах карбида бора и феррита меди, увеличивает содержание пор в спеке (рисунок 8, б). Структура композиционных материалов феррит меди-стекло-карбид бора с 8 об. % стекла представляет собой агломераты из частиц феррита меди, карбида бора и прослоек стекла. Эти агломераты соединены друг с другом прослойками стекла в различных агломератах. Поры в композиционном материале расположены как в местах стыков агломератов, так и в самих агломератах (см. рисунки 7, 8).

Характер изменения микроструктуры ферромагнитных композиционных материалов с карбидом кремния и карбидом бора при изменении температуры спекания, концентрации связующего показывает, что формирование композиционного материала зависит от условий растекания расплавов гидроксидного, а затем оксидного стекол по поровым каналам каркаса из частиц абразива и ферромагнитного наполнителя.

**Заключение.** Проведенное исследование позволили получить результаты по влиянию процессов спекания ферромагнитных композиционных материалов железо-стекло-карбид кремния (карбид бора), феррит меди-стекло-карбид кремния (карбид бора), концентрации связующего и температуры спекания на морфологию и микроструктуру композиционных материалов.

Исследование морфологии поверхности ферромагнитных композиционных материалов железо-стекло-карбид кремния (карбид бора); феррит меди-стекло-карбид кремния (карбид бора) показало, что структура этих материалов определяется концентрацией связующего и температурой спекания. В зависимости от концентрации связующего спекание шихты (брикетов) приводит к формированию композиционных материалов с различной структурой.

При концентрации связующего 25 об. % во всем температурном интервале спекания формируются композиционные материалы, структура которых представляет матрицу из ферромагнитного наполнителя (железа, феррита меди), в которой расположены частицы абразива.

Снижение содержания стекла в шихте, содержащей в качестве ферромагнитного наполнителя железо, до 15 об. % приводит к формированию композиционных материалов, структура которых представляет собой совокупность агломератов из частиц абразива, ферромагнитного наполнителя и стекла, объединенных в единое целое прослойками из частиц ферромагнитного наполнителя, абразива, в которых содержание стекла меньше, чем в агломератах. В области меньших концентраций стекла (8 об. %) формируются композиционные материалы, структура которых представляет собой сгусток из частиц абразива, ферромагнитного наполнителя и пленок стекла на поверхности частиц.

Формирование композиционных материалов, содержащих в качестве ферромагнитного наполнителя феррит меди, наблюдается только при концентрации стекла в шихте 25 об. %. Причиной этого являются меньшие размеры частиц феррита меди и взаимодействие стекла с ферритом меди.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Сакулевич, Ф.Ю. Основы магнитно-абразивной обработки / Ф.Ю. Сакулевич. – Минск : Наука и техника, 1981. – 326 с.
2. Гнесин, Г.Г. Принципы создания магнитно-абразивных материалов / Г.Г. Гнесин, М.Д. Крымский, Л.Н. Тульчинский // Магнитно-абразивные материалы и методы их испытания. – Киев : ИПМ АНУССР, 1980. – С. 17–25.
3. Оликер, В.Е. Порошки для магнитно-абразивной обработки и износостойких покрытий / В.Е. Оликер. – М. : Металлургия, 1990. – 176 с.
4. Ферроабразивные порошки для магнитно-абразивной обработки металлических поверхностей / Л.М. Акулович [и др.]. – Минск : БГАТУ, 2015. – 284 с.

Поступила 18.01.2019

#### STUDY OF THE PROCESSES OF SINTERING FERROMAGNETIC COMPOSITION MATERIALS BASED ON BORON CARBIDE, SILICON CARBIDE

S. YAKUBOVSKAYA, V. BABICH

*The morphology of the surface of ferromagnetic iron-glass-silicon carbide (boron carbide) composite materials has been studied; copper ferrite-glass-silicon carbide (boron carbide) which made it possible to establish that their structure is determined by the concentration of the binder and the sintering temperature. Depending on the concentration of the binder, sintering the mixture (briquettes) leads to the formation of composite materials with different structures.*

**Keywords:** magnetic abrasive processing, abrasive material, sintering of the charge, ferromagnetic composite materials.

УДК 621.793.14

**КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ С БИМОДАЛЬНОЙ СТРУКТУРОЙ  
НА ОСНОВЕ МИКРО- И НАНОПОРОШКОВ АЛМАЗА***д-р техн. наук, доц. В.И. ЖОРНИК**(Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, Минск)*

*Рассматривается получение беспористого поликристаллического материала на основе микропорошка алмаза. Показано, что введение в состав исходной шихты, содержащей частицы микропорошков алмаза, добавки в виде нанопорошков алмаза, а также модифицирование микро- и нанопорошков алмаза карбидообразующими элементами (кремний, бор) позволяют снизить уровень режимов спекания (температура, давление) и сформировать бимодальную структуру поликристаллического композиционного сверхтвёрдого материала с повышенными физико-механическими характеристиками (плотность, твердость, трещиностойкость). Сделан вывод, что одной из рациональных областей применения алмазных композиций с бимодальной структурой является правящий алмазный инструмент (карандаши, иглы).*

**Ключевые слова:** *композиционные материалы, микропорошки алмаза, модифицирование.*

**Введение.** Структурно-фазовое состояние любого материала в значительной степени определяет его свойства. Структура материала – это качественная характеристика взаиморасположения и взаимосвязей его определенных составных частей – структурных элементов. В зависимости от принятого масштаба можно выделить в любом материале разные структурные уровни, образующие некоторую последовательность, или иерархию. Эти структурные уровни не являются независимыми, каждая структура более крупного масштаба включает в себя в той или иной степени характерные черты всех нижележащих уровней. Таким образом, материал представляется как сложная многоуровневая иерархическая система. При этом выделенный для одного структурного уровня элемент, условно рассматриваемый как единое целое, выступает как подсистема со сложной внутренней структурой для другого, более низкого уровня, построенная из других выделенных элементов [1]. В настоящее время все более пристальное внимание в материаловедении уделяется формированию мультимодального структурного строения материала. При этом предполагается целенаправленное механическое, термическое, электрофизическое или химическое воздействие на материал для управляемого изменения его структурно-фазового состояния на различных размерных уровнях с формированием материала с различными степенями нано-, микро-, мезо- и макрогетерогенности, что позволяет повышать уровень широкого спектра его эксплуатационных характеристик.

Большой интерес, возникший в последние десятилетия к нанокompозитным структурам и наноструктурированным материалам, связан, прежде всего, с ожиданием различных размерных эффектов на наночастицах или наноструктурах, размеры которых соизмеримы или меньше, чем характерный корреляционный масштаб того или иного физического явления. При этом принципиально меняются физические явления, лежащие в основе работы элементов, происходит переход от стационарных равновесных состояний к самоорганизующейся диссипативной структуре, подчиняющейся неравновесной термодинамике и законам синергетики [2].

Прикладной интерес к наноматериалам обусловлен возможностью значительного модифицирования или даже принципиального изменения свойств известных материалов, а также новыми возможностями, которые открывает нанотехнология в создании материалов и изделий из структурных элементов нанометрового диапазона. Решение этих задач требует принципиально новых подходов как в области материаловедения, так и в области технологии синтеза и формообразования. Переход на субмикронный и нанометровый диапазон размеров элементов требует учета факторов масштабирования, отражающих влияние геометрических размеров на свойства материала. Становится возможным путем варьирования структурными и размерными параметрами (толщиной пленок, размерами включений, структурой границ раздела и пр.) в широких пределах менять энергетические характеристики создаваемой системы, а значит, получать необходимую комбинацию различных свойств (механических, электрофизических, оптических и других). Появляется реальная возможность изменять свойства материала, придавая ему характеристики, недостижимые для объемных материалов с традиционной микроразмерной структурой [3].

Современные тенденции в технологии обработки, направленные на интенсификацию ее процесса и повышение точности получаемых изделий, требуют применения новых инструментальных материалов для изготовления формообразующего, лезвийного и правящего инструмента, в частности поликристаллических композиционных сверхтвёрдых материалов (ПКСТМ) на основе алмаза и кубического нитрида бора. При этом к инструментальному материалу предъявляются повышенные требования по широкому спектру свойств (твердость, теплопроводность, термостойкость, трещиностойкость). Получение беспористых поликристаллических материалов на основе микропорошка алмаза возможно при использовании высоких

давлений (свыше 8 ГПа) и температур (свыше 2000 °С), что экономически неоправданно из-за низкой стойкости дорогостоящих аппаратов высокого давления (АВД). Снижение уровня режимов термобарического спекания и формирование мелкодисперсной структуры спеченных композитов – важная научно-техническая задача. Управление процессами формирования структуры поликристаллов позволяет создавать материалы с заданным уровнем дисперсности структуры и требуемым сочетанием физико-механических свойств.

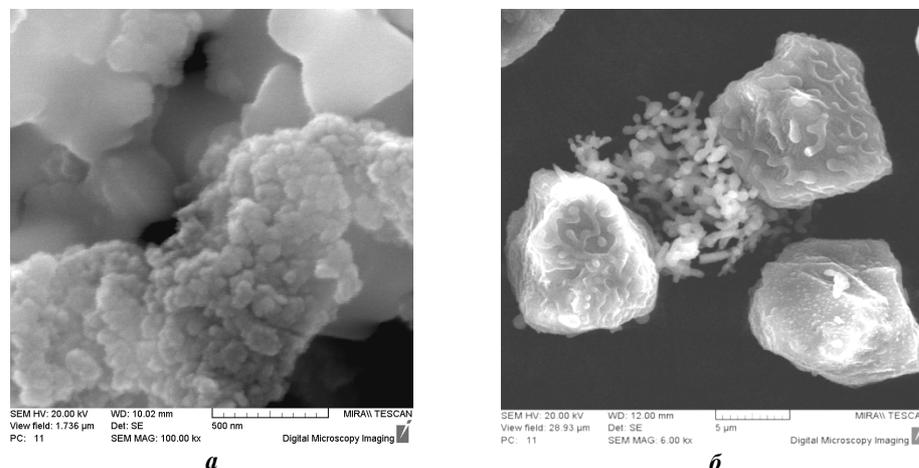
Целью работы выступает разработка метода получения ПКСТМ с бимодальной структурой на основе модифицированных карбидообразующими элементами микро- и нанопорошков алмаза, исследование его структурного состояния и свойств, а также определение области его рационального применения.

**Материалы и методика исследования.** В качестве исходных материалов использовались микропорошок алмазов статического синтеза АСМ с размером алмазов в диапазоне 10...14 мкм и удельной поверхностью  $S_{уд} = 0,42 \text{ м}^2/\text{г}$  (пр-во ЗАИ ПО «Кристалл», г. Гомель. – ГОСТ 9206-80) и порошок наноалмазов детонационного синтеза (ультрадисперсный алмаз (УДА) с размером частиц 4...10 нм и удельной поверхностью  $S_{уд} = 350 \text{ м}^2/\text{г}$  (пр-во НП ЗАО «Синта», г. Минск. – ТУ РБ 28619110.001-95).

Модифицирование поверхности алмазных порошков карбидообразующими элементами осуществлялось путем их высокотемпературного отжига в защитной атмосфере с осаждением активирующих добавок из газовой фазы в ходе газотранспортных реакций.

Модифицирующий отжиг алмазных порошков различных типов осуществлялся в герметичном контейнере под плавким затвором в восстановительной атмосфере диссоциированного аммиака, содержащей хлориды соответствующих соединений, в температурном интервале 800...950 °С при изотермической выдержке в течение 1...4 часов. В случае модифицирования порошков кремнием в контейнер помещали насыщающий источник в виде высокодисперсного карбида кремния (ГОСТ 26327-84), при модифицировании бором использовался микропорошок бора (ТУ 2112-001-49534204-2003).

Технологические процессы модифицирования алмаза, базирующиеся на газофазном осаждении из хлорсодержащих сред карбидообразующих элементов, характеризуются высокой эффективностью. Для реализации процесса не требуется применение вакуума, возможно получение высококачественных покрытий из широкого круга карбидообразующих элементов, основанных на образовании химических соединений в системе «алмаз – покрытие». Морфология модифицирования карбидообразующими элементами алмазных порошков представлена на рисунке 1, рентгенограмма алмазного порошка после отжига с карбидом кремния показана на рисунке 2.



**Рисунок 1. – Морфология порошков УДА после модифицирования бором (а) и порошков АСМ 14/10 после модифицирования кремнием (б) (между зёрнами алмаза видны дендритные агломераты кремния)**

Поликристаллические сверхтвёрдые материалы на основе модифицированных микро- и нанопорошков алмаза получались методом термобарического спекания на гидравлическом прессе модели ДО-138Б в аппаратах высокого давления (АВД) в следующем диапазоне технологических параметров: давление – 5...8 ГПа, температура – 1500...2200 °С, продолжительность спекания – 10...60 с.

Структурно-фазовое состояние ПКСТМ исследовалось методами рентгеноструктурного (дифрактометр D8 ADVANCE), рентгеноспектрального (микрорентгеноспектральный анализатор «INCA Energy 350») и дюриметрического (микротвердомер «Micromet-II») анализов, а также методами атомно-силовой (атомно-силовой микроскоп НАНОТОП-206), сканирующей электронной (сканирующий электронный микроскоп высокого разрешения «Mira») и оптической (микроскоп МИКРО 200-01) микроскопии.

Определение удельной поверхности проводили методом BET на анализаторе площади поверхности и размера пор SA 3100 фирмы «BECKMANCOULTER» (США). Анализ гранулометрического состава проводили на автоматическом анализаторе изображения «Mini-Magiscan» фирмы «Joyce Loebel» (Англия) по программе «Автоскан».

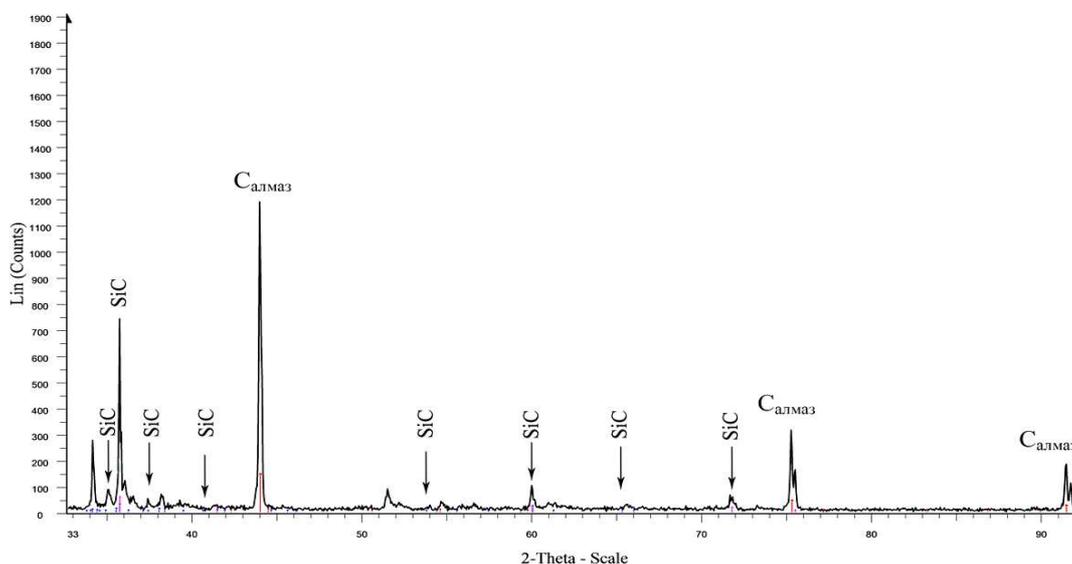


Рисунок 2. – Рентгенограмма алмазного микропорошка после отжига с карбидом кремния

Оценка качества получаемых ПКСТМ осуществлялась на основе результатов определения по общепринятым методикам комплекса их свойств, включая плотность, микротвердость, трещиностойкость. Оценка работоспособности правящего алмазного инструмента (карандашей и игл) осуществлялась по методикам, изложенным в ГОСТ 607-80 и ГОСТ 17564-85.

#### Результаты исследований и их обсуждение

*Структура и свойства алмазных композитов с бимодальным строением.* В работе [4] изложена методика модифицирования порошка УДА путем его отжига в защитной или восстановительной атмосфере методом химико-термической обработки, которая заключается в диффузионном насыщении поверхностного слоя частиц порошка различными элементами из газовой фазы. Для изменения структурно-фазового состава поверхности наноалмазов применялся также высокотемпературный отжиг в условиях вакуума.

Приведенные в работе [4] результаты исследований и данные других авторов, например [5], показывают, что модифицирование порошка УДА в ряде случаев позволяет повысить его прессуемость, что способствует повышению свойств поликристаллических алмазных материалов, получаемых спеканием под давлением. В частности, показано, что модифицирование порошка УДА бором наиболее эффективно с точки зрения улучшения его прессуемости, повышения стойкости против графитизации при спекании в условиях высоких давлений и температур. Химико-термическая обработка порошка УДА проводилась в атмосфере паров трихлорида бора при температуре 870 °С. Транспорт элементов осуществлялся через газовую фазу с последующим разложением на поверхности наноалмазов трихлорида бора. Бор обладает сродством к углероду и адсорбирует кислород, что способствует лучшей уплотняемости в процессе термобарического спекания УДА. В процессе спекания под давлением бор взаимодействует с углеродом с образованием карбида бора, который является высокотвердым тугоплавким химическим соединением и может служить связующим для алмазной керамики на основе УДА. Использование модифицированных порошков УДА позволяет добиться равномерного распределения образовавшихся тугоплавких карбидов в спеченном материале. Кроме того, вследствие своих каталитических свойств бор, так же как и металлы-катализаторы, снижает P-, T-условия фазового превращения «графит – алмаз», но при этом термостойкость таких поликристаллов существенно выше.

В таблице 1 представлены данные по влиянию концентрации УДА (В) ( $C_{УДА(В)} = 0...35$  масс. %) и режимов спекания ( $T, P, t$ ) на свойства компакта (твердость, трещиностойкость), анализ, которых показывает, что наиболее высокий уровень оцениваемых характеристик отмечен у образцов, полученных при  $T = 1900$  °С,  $P = 6,5$  ГПа,  $t = 15$  с, при концентрации порошка УДА (В) 20 масс. % ( $HV = 62,0$  ГПа,  $K_{1c} = 9,2$  МПа·м<sup>1/2</sup>). При этом, как видно из графика, представленного на рисунке 3, максимальная плотность ПКСТМ состава 80% АСМ (Si)+20% УДА (В) при давлении 6,5 ГПа и продолжительности спекания 15 с получена при температуре 1900 °С и составила 3,44 г/см<sup>3</sup>. Более высокий уровень температуры и продолжительности спекания, вызывает рост зерна и графитизацию алмаза, что негативно сказывается на физико-механических характеристиках композита.

Таблица 1. – Коэффициент трещиностойкости и микротвердость компакта на основе шихты АСМ(Si)+УДА(В)

C <sub>УДА(В)</sub> , масс. %	Режим термобарической обработки			Коэффициент трещиностойкости K <sub>1С</sub> , МПа·м <sup>1/2</sup>	Микротвердость HV, ГПа
	Температура спекания, °С	Давление, ГПа	Продолжительность спекания, с		
0	1900	6,0	15	5,8	42,3
10	1650	5,5	15	6,5	46,2
15	1700	6,0	15	7,1	50,2
15	1800	6,5	20	7,3	55,6
20	1900	6,5	20	8,7	60
25	1950	7,0	30	5,6	47,2
25	1800	7,5	25	7,0	53,9
30	1800	6,0	30	6,7	51,5
35	1750	6,0	20	6,3	47,2

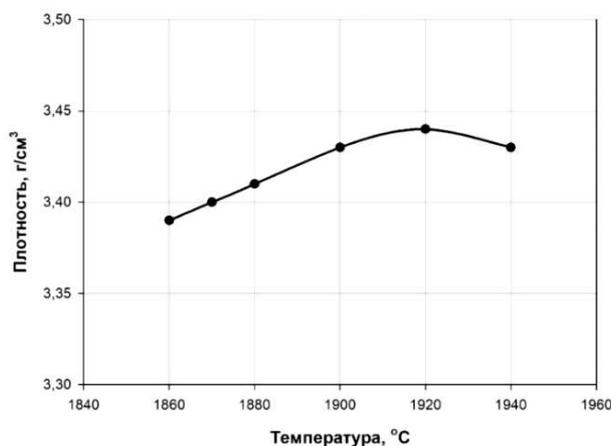


Рисунок 3. – Зависимость плотности ПКСТМ состава АСМ(Si)+УДА(В) от температуры спекания

Проведенный анализ морфологии модифицированных алмазных микропорошков показал, что кремний адсорбируется на поверхности алмазных зерен в виде частиц округлой (капельвидной) формы, которые в процессе роста объединяются в сплошную пленку толщиной порядка 200 нм, частично либо полностью покрывающую алмаз.

Количество карбида кремния SiC в ПКСТМ и фазовый состав последнего можно определить с использованием методики, представленной в работе [6]. Если предположить, что в процессе спекания часть алмаза претерпевает превращение в графитоподобный углерод, а затем в карбид кремния, то объемное содержание алмаза  $\varphi_a$  в конечном материале можно определить следующим образом:

$$\varphi_a = r(1 - \varepsilon_0) + (1 - \alpha) = 0,23(1 - 0,2) + (1 - 0,23) = 0,8 \rightarrow 80\%, \quad (1)$$

где  $\varepsilon_0$  – пористость сформированной заготовки из алмазного порошка;  $r$  – коэффициент, зависящий от режима спекания ПКСТМ.

Объемное содержание карбида кремния  $\varphi_k$  будет определяться количеством углерода, вступившего в реакцию с кремнием:

$$\varphi_k = r(1 - \varepsilon_0)\alpha M_k \rho_a / M_c \rho_k = \frac{0,23(1 - 0,2)0,23 \cdot 40,11 \cdot 3,5}{12,0107 \cdot 3,21} = 0,154 \rightarrow 15,4\%, \quad (2)$$

где  $M_k$  и  $M_c$  – соответственно молекулярные массы карбида кремния и углерода;  $\rho_a$  и  $\rho_k$  – плотности алмаза и карбида кремния соответственно;  $\alpha$  – степень превращения алмаза в карбид кремния SiC, которая зависит от зернистости алмазного порошка [6].

Содержание непрореагировавшего кремния  $\varphi_{Si}$  в беспористом материале будет равно

$$\varphi_{Si} = 1 - (\varphi_k + \varphi_a) = 1 - (0,154 + 0,8) = 0,046 \rightarrow 4,6\%. \quad (3)$$

Из приведенных расчетов следует, что количество кремния, вступившего в реакции с графитоподобным углеродом с образованием в результате карбида кремния, достигает 77%.

Рентгеноструктурный анализ спеченных образцов показал, что при режимах термобарической обработки в пределах температуры спекания 1750...1950 °С, при давлении в диапазоне от 5,5...7,5 ГПа в течение 15...25 с на рентгенограмме отмечено появление карбида кремния SiC, который образуется

в результате частичной графитизации алмаза и последующей реакции графита с кремнием с образованием высокодисперсного SiC (рисунок 4).

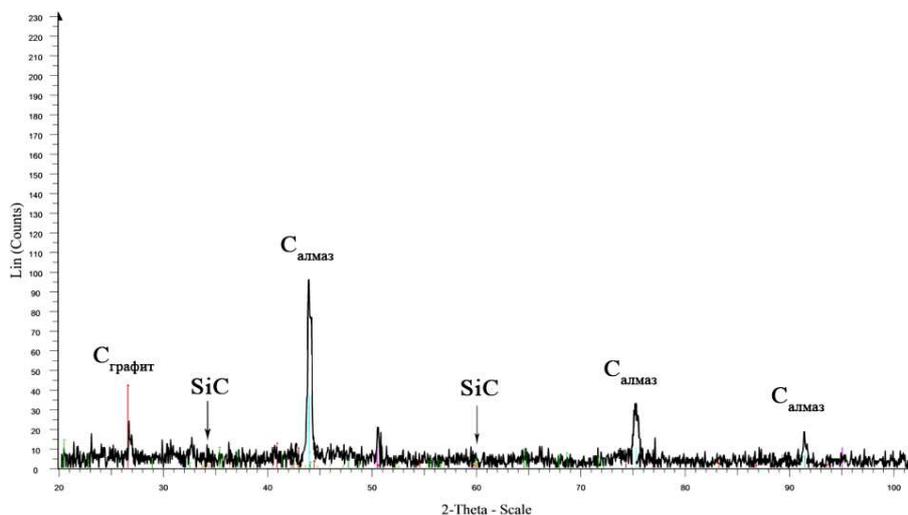
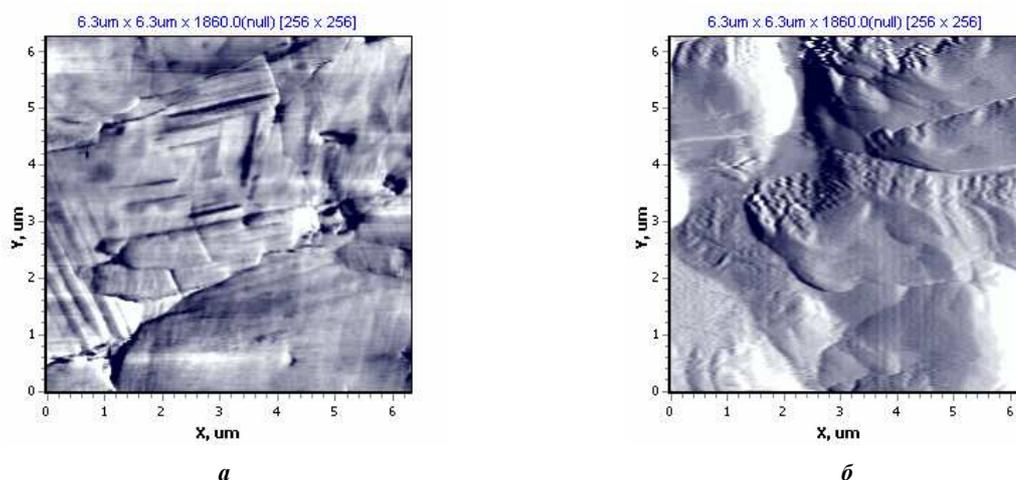


Рисунок 4. – Рентгенограмма спеченного при  $T = 1900\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $P = 6,5\text{ ГПа}$ ,  $t = 15\text{ с}$  композита состава АСМ(Si)+УДА(В) (излучение Cu-K $_{\alpha}$ )

На рентгенограмме присутствует и небольшое количество рефлексов, которые не удалось расшифровать в базе данных картотеки PDF-2. При увеличении продолжительности термобарического спекания образцов свыше 25 с, а также при увеличении температуры термобарического спекания образцов свыше  $1950\text{ }^{\circ}\text{C}$ , в которых отмечается присутствие графита вследствие большей степени графитизации алмаза.

На рисунке 5 представлена морфология поверхности ПКСТМ на основе микропорошка АСМ 14/10, модифицированного кремнием, и компакта состава АСМ(Si)+УДА(В) после термобарической обработки по режиму:  $T = 1900\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $P = 6,5\text{ ГПа}$ ;  $t = 15\text{ с}$ .

Из приведенных иллюстраций можно заключить, что добавление УДА(В) к модифицированному кремнием микропорошку алмаза значительно влияет на формирование межзёренных приграничных областей спеченного компакта, в то время как для компакта без добавления УДА(В) характерно наличие резко очерченных межзёренных границ (рисунок 5, а). Морфология поверхности компакта, модифицированного порошком УДА(В), имеет более однородную и плотную структуру с наличием сплавленных межзёренных границ (рисунок 5, б).



а – АСМ(Si); б – АСМ(Si)+УДА(В)

Рисунок 5. – Морфология поверхности ПКСТМ после термобарической обработки ( $T = 1900\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $P = 6,5\text{ ГПа}$ ;  $t = 15\text{ с}$ )

Спеченный композиционный материал на основе шихты АСМ 14/10(Si)+УДА(В) также характеризуется более высокой трещиностойкостью (таблица 2).

Таблица 2. – Свойства поликристаллического сверхтвёрдого материала на основе алмазных микропорошков

Состав шихты	Плотность $\rho$ , г/см <sup>3</sup>	Коэффициент трещиностойкости $K_{Ic}$ , МПа·м <sup>1/2</sup>	Твёрдость $HV$ , ГПа
<i>Алмазный ПКСТМ без модифицирования и добавки УДА(В)</i>			
АСМ 14/10	3,23	6,5	37
<i>Алмазный ПКСТМ с модифицированием и добавкой УДА(В)</i>			
АСМ 14/10(Si)+УДА(В)	3,44	9,2	62

Модельные представления процесса формирования бимодальной структуры. Физико-механические свойства композиционных материалов на основе алмазных порошков существенно зависят от фазового состава, дисперсности и взаимодействия компонентов шихты. Как правило, спекание таких материалов проводят при высоких давлениях в области термодинамической стабильности алмаза. Наличие в матрице определенных тугоплавких соединений позволяет повысить пластичность композита, уменьшить процессы рекристаллизации и обратного фазового превращения «алмаз – графит». Использование порошков УДА позволяет рассматривать возможность использования их как активаторов спекания. Использование карбидообразующих элементов позволяет снизить параметры термобарического спекания. Механизм формирования бимодальной структуры ПКСТМ отображен на рисунке 6 на примере композита состава АСМ(Si)+УДА(В).

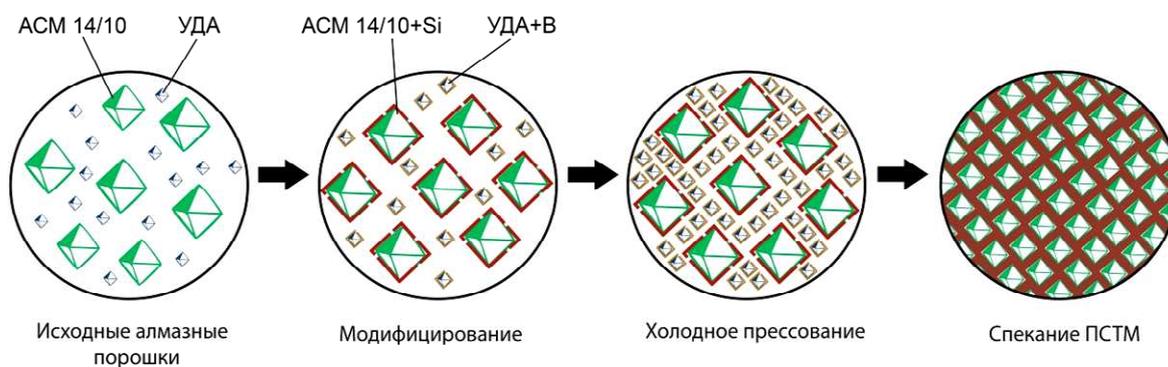
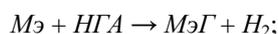


Рисунок 6. – Модельные представления процесса формирования структуры ПКСТМ состава АСМ(Si)+УДА(В)

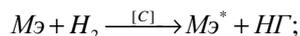
Сверхтвёрдый композиционный материал на основе алмазных микро- и нанопорошков изготовлен методом термобарического спекания с предварительной обработкой алмазных порошков в виде модифицирования карбидообразующими элементами (кремнием и бором). В основу технологии модифицирования положен процесс химико-термической обработки с участием хлорирующего реагента. Механизм транспортных реакций при этом включает в себя следующие стадии: хлорирование модифицирующего элемента ( $M\Gamma$ ); транспорт  $M\Gamma$  на поверхность осаждения; адсорбцию  $M\Gamma$  и  $H_2$  на поверхности; химическую реакцию между адсорбированными веществами ( $M\Gamma + H_2$ ) с галогенидом ( $H\Gamma$ ); диффузию модифицирующего элемента в алмазное зерно, частицы.

Стадийность протекания газотранспортных реакций можно представить следующим образом:

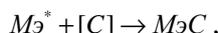
- хлорирование модифицирующего элемента



- транспорт и адсорбция  $M\Gamma$  и  $H_2$  на поверхность осаждения (алмаза);
- реакция разложения между адсорбированными веществами



- процесс карбидообразования по реакции присоединения



где  $M\Gamma$  – модифицирующий элемент покрытия (Si, B и др.);  $H\Gamma$  – галогенид;  $[C]$  – зёрна, частицы алмаза (поверхность осаждения);  $M\Gamma^*$  – атомарный модифицирующий элемент, формирующий покрытие на поверхности алмаза.

Таким образом, проведенные исследования позволили обосновать высокую эффективность процессов, основанных на газофазном осаждении из хлорсодержащих сред карбидообразующих элементов. Для реализации процессов достаточно использовать электропечь (без необходимости применения доро-

гостящего оборудования – вакуумных печей), с обеспечением получения высококачественных покрытий из широкого круга карбидообразующих элементов, основанных на образовании химических соединений в системе «алмаз – покрытие».

После проведенной операции модифицирования на частицах алмазного порошка образовывается пленка из карбидообразующего элемента. При термобарическом спекании формируется однородная микроструктура поликристаллического композиционного сверхтвердого материала, содержащего микрочастицы алмаза, прочно соединенные между собой карбидной сеткой из карбидов кремния и бора, упрочненной наночастицами алмаза.

Предложенные модельные представления процесса получения композиционных алмазных материалов с повышенными физико-механическими свойствами на основе термобарического спекания композиции, содержащей предварительно модифицированные карбидообразующими элементами микро- и нанопорошки алмаза, отражают формирование в процессе спекания бимодальной структуры композита, включающей пространственный каркас из микроразмерных частиц алмаза, обеспечивающих прочностные характеристики и функциональные свойства композиционного материала на макроуровне, и упрочненную наноалмазными частицами карбидную сетку с высокой прочностью соединения на границе «микроалмаз – карбид», обуславливающую когезионную прочность спеченного композита на микроуровне.

При термобарическом спекании в диапазоне температур 1875...1925 °С, давлении 6,2...6,7 ГПа при концентрации добавки порошка УДА(В) 17,6...22,4 масс.% происходит образование межзеренных связей в алмазе за счет пластической деформации материала, что проявляется, в частности, в повышении механических характеристик поликристаллов. Данный механизм является преимущественным при спекании исследуемого композиционного материала, так как в таком режиме термобарической обработки фиксируется повышение физико-механических характеристик ( $HV$  и  $K_{1C}$ ) получаемых компактов.

Результаты исследования свидетельствуют, что взаимодействие АСМ с кремнием и УДА с бором носит диффузионный характер, и при спекании под высоким давлением между исходными фазами композита и модифицирующего элемента происходит процесс реакционной диффузии с образованием соединений в зоне контактов частиц. Возникающие химические соединения обеспечивают прочное сцепление зёрен алмаза с УДА с частицами наполнителя и частиц наполнителя между собой. Вместе с тем следует отметить, что химическое взаимодействие зёрен алмаза и наполнителя протекает в очень узких приконтактных слоях, не затрагивая основного объема микрозёрен алмаза. Это обеспечивает высокие физико-механические характеристики композита.

Оптимизация процесса получения ПКСТМ состава АСМ(Si)+УДА(В) по критериям рационального сочетания твердости и трещиностойкости спеченного композита ( $HV = 58...60$  ГПа,  $K_{1C} = 8,5...9,0$  МПа·м<sup>1/2</sup>) показала, что технологические параметры процесса термобарического спекания должны соответствовать следующим диапазонам: температура спекания  $T = 1900 \pm 25$  °С; давление  $P = 6,5 \pm 0,25$  ГПа при продолжительности спекания  $t = 10...20$  с и концентрации добавки порошка УДА  $C_{УДА} = 20 \pm 2,5$  масс. %.

*Область применения алмазных композитов с бимодальной структурой.* На основе модифицированных алмазных микро- и нанопорошков путем спекания в условиях высоких давлений и температур получены поликристаллические блоки (компакты) для изготовления правящего инструмента (карандаши, иглы), который может использоваться при правке шлифовальных кругов (рисунок 7).



**Рисунок 7. – Поликристаллические блоки (а) и правящий инструмент (б – карандаш; в – игла), изготовленные на основе ПКСТМ из модифицированных микро- и нанопорошков алмаза**

Результаты испытаний показали, что экспериментальные образцы каждого из видов правящего алмазного инструмента, изготовленного с использованием ПКСТМ с бимодальной структурой, по эксплуатационным показателям превышают требования соответствующих стандартов. Так, для правящих алмазных карандашей усредненное значение удельной производительности составило 38,5 см<sup>3</sup>/мг (по ГОСТ 607-80

должно быть не менее  $34,0 \text{ см}^3/\text{мг}$ ), а для правящих алмазных игл усредненный расход алмаза на 1000 правок при длине правки 16 мм составил 41,0 мг (по ГОСТ 17564-85 – не более 43,6 мг).

**Закключение.** Получение беспористого поликристаллического материала на основе микропорошка алмаза возможно при использовании высоких давлений (свыше 8 ГПа) и температур (свыше 2000 °С), что экономически неоправданно из-за низкой стойкости дорогостоящих АД. Модифицирование микро- и нанопорошков алмаза карбидообразующими элементами и формирование структуры композита с бимодальным строением позволяет повысить физико-механические характеристики спеченных ПКСТМ (плотность, твердость, трещиностойкость) при снижении параметров спекания (давление и температура).

Преимущества получаемого поликристаллического алмазного материала с бимодальной структурой на основе модифицированных микро- и нанопорошков алмаза реализуются через следующие механизмы:

- повышение плотности ПКСТМ за счет увеличения насыпной плотности композиции в результате заполнения межзёрненных пустот микропорошка частицами наноалмаза и их агломератами;
- улучшение прессуемости алмазных микро- и нанопорошков за счет формирования на их поверхности пленок, снижающих трение, при модифицировании химико-термической обработкой;
- повышение термостойкости и замедление процесса графитизации алмаза при спекании за счет появления на поверхности микро- и нанопорошков алмаза карбидной пленки в результате их модифицирования;
- формирование прочной карбидной сетки за счет реакционного спекания композиции из модифицированных карбидообразующими элементами микро- и нанопорошков алмаза;
- использование наноалмазов детонационного синтеза, характеризующихся высокой удельной поверхностью и повышенным количеством дефектов, способствует улучшению спекаемости композиции за счет ускорения диффузионных процессов.

Оптимизация процесса получения ПКСТМ состава АСМ(Si)+УДА(B) по критериям рационального сочетания твердости и трещиностойкости спеченного композита ( $HV = 58...60 \text{ ГПа}$ ,  $K_{1C} = 8,5...9,0 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{1/2}$ ) показала, что технологические параметры процесса термобарического спекания должны входить в следующие диапазоны: температура спекания  $T = 1900 \pm 25 \text{ °С}$ ; давление  $P = 6,5 \pm 0,25 \text{ ГПа}$  при продолжительности спекания  $t = 10...20 \text{ секунд}$  и концентрации добавки порошка УДА  $C_{УДА} = 20 \pm 2,5 \text{ масс. \%}$ .

Одна из рациональных областей применения алмазных композитов с бимодальной структурой – правящий алмазный инструмент (карандаши, иглы).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Скороход, В.В. Консолидированные наноструктурные материалы / В.В. Скороход, А.В. Рагуля. – Киев : Наукова думка, 2007. – 374 с.
2. Гусев, А.И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии / А.И. Гусев. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2005. – 416 с.
3. Андриевский, Р.А. Наноструктурные материалы / Р.А. Андриевский, А.В. Рагуля. – М. : Академия, 2005. – 192 с.
4. Жорник, В.И. Разработка физической модели процесса структурообразования поликристаллического сверхтвердого материала с бимодальной структурой на основе модифицированных алмазных порошков / В.И. Жорник, А.М. Парницкий, В.Т. Сенють // Механика машин, механизмов и материалов. – 2018. – № 3 (44). – С. 83–91.
5. Наноалмазы детонационного синтеза : получение и применение / П.А. Витязь [и др.] ; под общ. ред. П.А. Витязя. – Минск : Беларус. навука, 2013. – 381 с.
6. Катаев, С.А. Алмаз-карбидный композиционный материал «Скелетон» для теплопроводов в изделиях электронной техники / С.А. Катаев, В.С. Сидоров, С.К. Гордеев // Электроника : НТБ, 2011. – № 3. – С. 60–64.

Поступила 05.02.2019

#### COMPOSITE MATERIALS WITH BIMODAL STRUCTURE BASED ON MICRO- AND NANOPOWDERS OF DIAMOND

V. ZHORNIK

*It is shown that the introduction of the diamond nanopowders into the initial mixture containing of diamond micropowders, as well as modification of micro- and diamond nanopowders by the carbide-forming elements (silicon, boron), allows to reduce the level of sintering modes (temperature, pressure) and to form the bimodal structure of a polycrystalline composite superhard material with enhanced physico-mechanical characteristics (density, hardness, crack resistance). One of the rational areas of application of diamond composites with a bimodal structure is the adjusting diamond tools (pencils, needles).*

**Keywords:** composite materials, diamond micro powders, modification, bimodal structure.

УДК 621.793

**АНАЛИТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА НЕОБХОДИМЫХ ПАРАМЕТРОВ  
ГАЗОПЛАМЕННОЙ СТРУИ ПРИ НАПЫЛЕНИИ ПОЛИМЕРНЫХ ПОКРЫТИЙ****д-р техн. наук М.А. БЕЛОЦЕРКОВСКИЙ***(Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, Минск)*

*Проведен теоретический анализ процесса нагрева полимерного порошка и полимерного шнура в факеле пламени пропано-воздушной смеси. Выполнена теоретическая оценка величины плотности теплового потока при газопламенном напылении порошков из термопластичных полимеров. Рассмотрена физическая модель процесса газопламенного распыления полимерных шнуров. Получено выражение, определяющее связь между теплофизическими, динамическими параметрами струи газа и скоростью подачи полимерного шнура.*

**Ключевые слова:** *газопламенное напыление, порошки термопластичных полимеров, распыление полимерных шнуров, теплофизические параметры факела.*

**Введение.** Эффективность процесса нанесения полимерных покрытий газопламенными аппаратами зависит от ряда факторов, в том числе от состава исходной горючей смеси, условий ее сжигания, теплофизических свойств напыляемого материала [1–5]. Состав и условия сжигания горючей смеси определяют плотность теплового потока, воздействующего на распыляемые частицы, и в значительной мере оказывают влияние на свойства получаемых покрытий. Эффективное использование энергии, выделяющейся при сгорании горючей смеси, является важнейшей задачей оптимизации процесса напыления покрытий, особенно из таких легкоплавких материалов, как полимеры.

Получение высококачественных газопламенных порошковых полимерных покрытий с заданными свойствами невозможно осуществить без определения рациональных технологических режимов, которые, как правило, устанавливались экспериментальным путем с помощью различных термораспылительных устройств. Причем в известных рекомендациях отсутствует единое мнение как по выбору теплофизических параметров факела, так и по конструкции термораспылителей [6; 7].

К настоящему времени разработаны и широко применяются различные технологии газопламенного напыления покрытий, использующие наносимый материал в виде проволок, гибких шнуров, стержней [8; 9]. Практически все они реализуются по одной принципиальной схеме, основными этапами которой являются: нагрев концевой участка проволоки (стержня) до плавления кольцевым факелом; сдувание и диспергирование расплава газовым (воздушным) потоком; перенос образовавшихся частиц газовым потоком на напыляемую поверхность. Использование известных проволочных термораспылителей, предназначенных для нанесения металлических покрытий, при распылении полимерных шнуров не дало положительных результатов. Это обусловлено, прежде всего, невысокой теплопроводностью полимеров и малой разницей между температурой плавления и температурой деструкции полимера, которая для большинства термопластов не превышает 100...150 °С. Тепло от факела аккумулируется только на поверхности, не проникая во внутренние слои полимера.

*Задачи исследований, результаты которых приведены в данной работе:*

- определение оптимальной величины плотности теплового потока факела при напылении покрытий из порошков термопластов;
- определение значений теплофизических и динамических параметров струи, распыляющей полимерные шнуры, исключающие деструкцию наносимого материала.

**Анализ процесса нагрева полимерных порошков в факеле термораспылителя.** При оценке процесса теплообмена между пламенем термораспылителя и напыляемыми частицами полимера в процессе газопламенного напыления (ГПН) были сделаны следующие допущения:

- изменение теплофизических характеристик пламени в поперечном сечении не учитывалось;
- факел пламени считали источником конвективного теплообмена;
- длину ядра пропано-воздушного пламени приняли равной 0,04...0,08 м;
- определяемый удельный поток конвективной теплоотдачи должен проплавливать частицы порошка, но не нагревать их выше  $1,5T_{пл}$  (где  $T_{пл}$  – температура плавления полимера);
- температура среды  $T_c$ , коэффициент теплообмена  $\alpha$ , теплоемкость  $c$  и удельная теплота плавления  $\lambda$  материала частиц постоянны и не изменяются в процессе их нагрева в пламени;
- пренебрегали радиальной и продольной неоднородностью потока, пространственно временными пульсациями зоны нагрева, абляцией полимерного материала.

Получив выражение для определения коэффициента теплообмена, возникающего при ГПН между поверхностью напыляемой частицы и высокотемпературной средой, и используя его в уравнении теплопроводности параболического типа для сферических частиц [10], получена следующая система уравнений:

$$T(0,5R_{\max}, \tau_{\min}) = \frac{q}{Fo \cdot \alpha} \left\{ Fo - \frac{1}{6} \left[ 0,75 + \frac{2}{Bi} \right] + A \frac{2 \sin(0,5\mu) \cdot \exp(-\mu^2 \cdot Fo)}{\mu^3} \right\} + T_0 \geq T_{пл};$$

$$T(R_{\min}, \tau_{\max}) = \frac{q}{Fo \cdot \alpha} \left\{ Fo - \frac{1}{6} \left[ 1 + \frac{2}{Bi} \right] + A \frac{\sin \mu \cdot \exp(-\mu^2 \cdot Fo)}{\mu^3} \right\} + T_0 \leq 1,5T_{пл},$$
(1)

где  $T(0,5R_{\max}, \tau_{\min})$  – температура внутри частицы максимального диаметра в процессе напыления с минимальной дистанции, К;  $T(R_{\min}, \tau_{\max})$  – температура на поверхности частицы минимального диаметра в процессе напыления с максимальной дистанции, К;  $q$  – плотность теплового потока (количество теплоты, проходящее через поверхность частицы), Вт/м<sup>2</sup>;  $\alpha$  – коэффициент теплообмена, Вт/(м<sup>2</sup>·К).

Решение системы (1) позволяет вычислить не только оптимальную плотность теплового потока, но и диапазон, в котором должны находиться теплофизические параметры факела пламени, предотвращающие термоокислительную деструкцию полимерной частицы.

Таким образом, выполненный теоретический расчет оптимальной плотности теплового потока при газопламенном напылении полимерных порошков позволяет провести предварительный анализ нагрева частиц полимера и выбрать оптимальные параметры процесса напыления.

Для оценки необходимой и достаточной плотности теплового потока пламени при напылении полимеров с различными теплофизическими характеристиками рассмотрим нагрев частиц следующих полимерных материалов с различными теплофизическими характеристиками: полиэтилентерефталат низкотемпературный (ПЭТФ НТ); полиэтилентерефталат высокотемпературный (ПЭТФ ВТ); сэвилен (сополимер этилена с винилацетатом); полиэтилен высокого давления низкой плотности (ПЭВД); полиамид (ПА-6); фторопласт-3М.

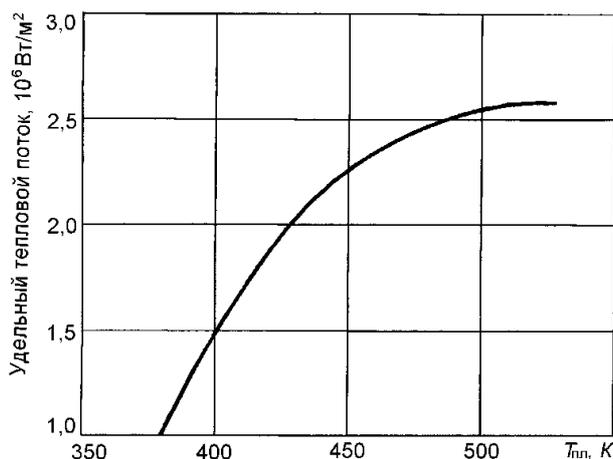
Исходные данные для расчета приведены в таблице 1, результаты расчета представлены в таблице 2 и отображены на рисунке 1.

Таблица 1. – Исходные данные для расчета оптимальной величины плотности теплового потока

Параметр	Ед. изм.	Значение					
		ПЭТФ НТ	ПЭТФ ВТ	Сэвилен	ПЭВД	Полиамид	Фторопласт-3М
Начальная температура частицы $T_0$	К	293					
Радиус частицы	$R_{\min}$	50·10 <sup>6</sup>					
	$R_{\max}$	350·10 <sup>6</sup>					
Время нахождения в тепловом потоке	$\tau_{\min}$	0,005					
	$\tau_{\max}$	0,0075					
Коэффициент температуропроводности полимера $a_{пл}$ , 10 <sup>7</sup>	м <sup>2</sup> /с	1,1		1,6	2,0	1,2	1,05
Коэффициент теплопроводности полимера $\lambda_{пл}$	Вт/м·К	0,45		0,3	0,5	0,32	0,43
Температура плавления полимера $T_{пл}$	К	383	528	393	398	488	523
Удельная масса полимера $\rho$	кг/м <sup>3</sup>	1409		940	954	1100	2200
Удельная теплота плавления $\lambda$	кДж/кг	302		288		270	178
Удельная теплоемкость, с	кДж/кг·К	2,3		2,8		1,7	3,4

Таблица 2. – Необходимые теплофизические параметры факела пламени

Материал частицы	Средняя температура пламени $T_c$ , К	Плотность теплового потока $q$ , Вт/м <sup>2</sup>	
		$q_{\min}$	$q_{\max}$
ПЭТФ НТ	2200	1,0·10 <sup>6</sup>	1,2·10 <sup>6</sup>
ПЭТФ ВТ		2,5·10 <sup>6</sup>	2,7·10 <sup>6</sup>
Сэвилен		1,2·10 <sup>6</sup>	1,3·10 <sup>6</sup>
ПЭВД		1,4·10 <sup>6</sup>	1,5·10 <sup>6</sup>
Полиамид		2,3·10 <sup>6</sup>	2,4·10 <sup>6</sup>
Фторопласт-3М		2,4·10 <sup>6</sup>	2,7·10 <sup>6</sup>



**Рисунок 1.** – Зависимость удельного потока конвективной теплоотдачи факела пропано-воздушного пламени термораспылителя от температуры плавления напыляемого полимера

**Аналитическое описание процесса газопламенного распыления полимерных шнуров.** На основании анализа работ по переработке полимерных материалов [1; 3; 11; 12] сформулировано основное требование к процессу газопламенного распыления термопластичных шнуров, которое заключается в том, что плавление необходимо осуществлять при непрерывном удалении с поверхности шнура образующегося слоя расплава. Одним из возможных вариантов реализации этого требования является реализация процесса нагрева и распыления (диспергирования) одной струей газа, обладающей энергией, способной не только расплавлять полимер, но и формировать касательные напряжения (силы трения) на поверхности расплава, превышающие вязкость слоя этого расплава. Таким образом, определение необходимых теплофизических и динамических параметров струи газа – основная задача теоретического анализа процесса распыления полимерных шнуров.

Анализ физической модели процесса газопламенного распыления полимерных проволок показывает, что производительность процесса формирования покрытий и их свойства будут в основном определяться взаимосвязью теплофизических и динамических параметров распыляющей струи газа.

Вследствие специфики свойств термопластичных полимеров энергия газовой струи, передаваемая полимерному шнуру и далее образующемуся расплаву, должна лежать в довольно узком диапазоне. С одной стороны, ее должно быть достаточно для удаления слоя расплава малой толщины, поскольку по мере возрастания толщины слоя расплава поток тепла в расплав полимера и скорость его плавления быстро уменьшаются [11]. С другой стороны, избыток тепловложения приведет к деструкции полимера, что резко снизит качество покрытия, поэтому задаваемое условие – в процессе распыления струя газа не должна нагревать полимер свыше  $1,5T_{пл}$ . Очевидно, что максимальная температура полимера будет находиться на границе раздела фаз «газ – расплав», причем вследствие низкой теплопроводности полимеров считаем, что все тепло будет аккумулироваться в некотором «тонком» слое  $\delta$ , причем  $\delta \ll r$  ( $r$  – радиус распыляемого шнура). Определим необходимые теплофизические и динамические параметры распыляющей струи газа, обеспечивающие максимальную скорость подачи распыляемого шнура без перегрева полимерного расплава, т.е. свыше  $1,5T_{пл}$ .

Рассмотрим процесс газопламенного распыления полимерного шнура как процесс симметричного продольного обтекания бесконечно длинного цилиндра высокотемпературным газовым потоком (рисунок 2). То есть теплообмен между струей газа и цилиндром с торцевых поверхностей отсутствует.

При этом сделаны некоторые обоснованные допущения:

- 1) гравитационные силы пренебрежимо малы;
- 2) шнур – цилиндр из однородного полимерного материала (теплофизические свойства в продольном и поперечном сечении шнура постоянны);
- 3) образующийся расплав – несжимаемая жидкость;
- 4) изменения теплофизических и динамических параметров распыляющей струи газа в зоне плавления шнура пренебрежимо малы;
- 5) поскольку  $\delta \ll r$ , распределение температур в слое  $\delta$  будем определять уравнением теплопроводности как для плоской стенки;
- 6) так как рассматривается повышение температуры слоя расплава, то количество тепла, идущее на фазовые переходы, не учитывается.

Распределение температур в шнуре на участке  $L_{пл}$  определяли с помощью уравнения теплопроводности для плоской стенки. Далее, используя интегральный метод теплового баланса [13], находили температуру поверхности шнура и тепловую мощность струи газа. Ограничение тепловой мощности распыляющей струи газа определяется теплофизическими свойствами полимера и временем нахождения (нагрева) полимера в зоне плавления. Для нахождения времени  $t$  (при условии, что длина зоны плавления  $L_{пл}$  известна) необходимо найти скорость перемещения  $V_{пер}$  расплава относительно неподвижной точки «0» начала действия струи газа на шнур в зоне плавления.

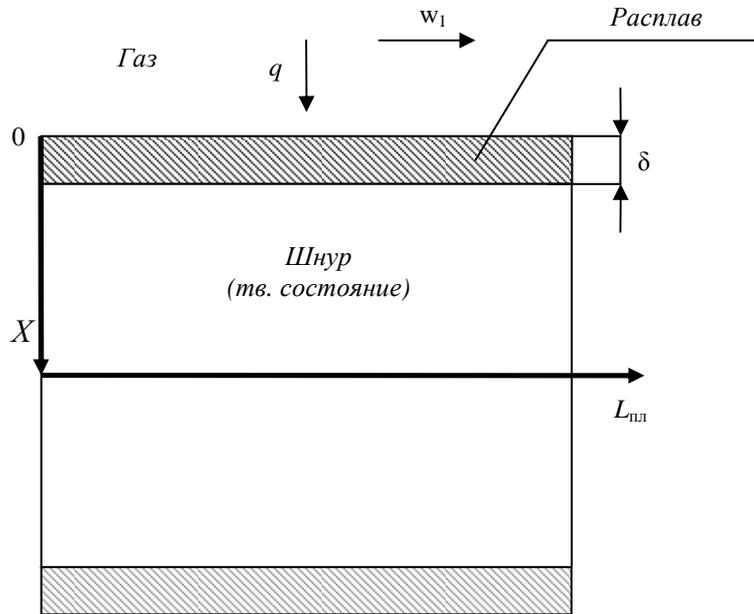


Рисунок 2. – Схема процесса газопламенного расплытия полимерного шнура

На основании сделанных допущений рассмотрим перемещение расплава как течение весьма тонкой пленки вязкой жидкости под действием струи газа, движущегося над ее поверхностью. Скорость перемещения расплава находили с помощью уравнений одномерного движения тонкой пленки (длина волны превышает амплитуду волны), в частности уравнениями пограничного слоя Навье – Стокса [14]. Далее с использованием данных работы [15], посвященной гидродинамическим явлениям в тонких пленках при их «сдувании» турбулентным газовым потоком, получили выражение, определяющее связь между теплофизическими и динамическими параметрами струи газа и скоростью подачи шнура:

$$w_1 = \left[ \frac{3q^2 a L_{пл} \mu}{0.03(T_{нов} - T_0)^2 \lambda^2 \rho_1 \left( d - \frac{2qL_{пл}}{c\rho_2 V_{под}} \right) \left( \frac{R_t}{v} \right)^{0.25}} \right]^{\frac{4}{7}} ; \quad (2)$$

$$V_p(w_1, q) = \frac{2q \cdot L}{c \cdot \rho_2 \left( \frac{3q^2 a \cdot L \cdot \mu \cdot R_t^{0.25}}{w_1^{1.75} \cdot T^2 \lambda^2 \rho_1 v^{0.25}} \right)} . \quad (3)$$

Решение проводилось с помощью программного пакета Mathcad (рисунок 3). При этом были использованы следующие справочные значения для полиамида ПА 6 и свойств газа распыляющей струи:  $a = 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$ ;  $\mu = 10^2 \text{ Па}\cdot\text{с}$ ;  $\lambda = 0,2 \text{ Вт}/\text{м}\cdot\text{град}$ ;  $\rho_1 = 1$ ;  $c = 10^5 \text{ Дж}/\text{кг}$ ;  $\rho_2 = 10^3$ ;  $v = 3 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$ . Кроме того, исходя из практики процесса газопламенного напыления, остальные значения были выбраны следующими:  $L_{пл} = 0,05 \text{ м}$ ;  $d = 3 \text{ мм}$ ;  $R_t = 5 \cdot 10^{-3}$ .

Анализ полученных зависимостей скорости подачи шнура от тепловой мощности и скорости распыляющей струи газа показал, что процесс расплытия необходимо осуществлять с определенной взаимосвязью теплофизических и динамических параметров струи газа.

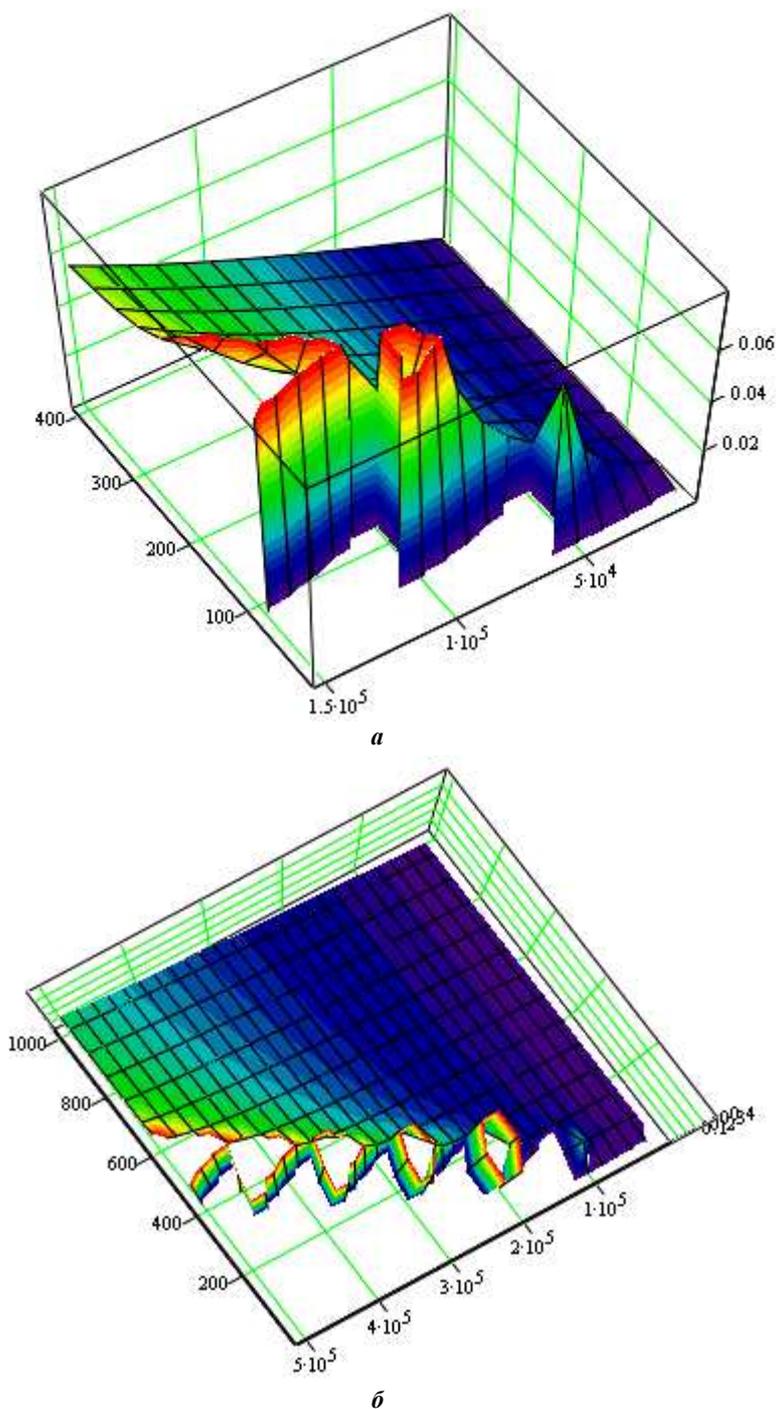


Рисунок 3. – Зависимости скорости подачи шнура от мощности теплового потока (а) и скорости струи в зоне плавления (б)

В связи с тем, что зависимость при определенных параметрах струи газа имеет существенные различия (например, имеет экстремальный характер), ее условно можно охарактеризовать следующими тремя областями (интервалами) значений струи газа, при которых осуществляется распыление:

1) область значений, при которых процесс распыления осуществлять невозможно. По всей видимости, при данных значениях струи газа будет происходить перегрев полимерного слоя в зоне плавления шнура по причине низкой динамической мощности струи газа, вследствие чего процесс распыления шнура будет осуществляться с низким коэффициентом использования материала и измененной химической структурой полимера;

2) область оптимальных значений параметров струи газа, которая характеризуется максимальными скоростями подачи. Наличие данной области можно объяснить тем, что процесс распыления

начинается лишь с определенных значений струи газа, когда формируемые касательные напряжения на поверхности шнура превышают вязкость расплавленного на его поверхности полимерного слоя, однако повышение ее динамической мощности без повышения ее тепловой мощности не приводит к эффективности процесса распыления. То есть с некоторого момента повышение скорости струи газа приводит не к повышению скорости течения расплава, а лишь к его утончению и соответственно возможному перегреву;

3) *область неэффективных значений параметров струи газа.* Она характеризуется избытком динамической мощности струи газа, с повышением скорости струи без повышения тепловой мощности эффективность процесса распыления не увеличивается, что можно связать с низкими тепловыми потоками и, соответственно, с большим временем образования на поверхности шнура слоя необходимой толщины, при которой возможно его течение.

Далее выполнены расчеты по определению необходимой скорости струи газа, обеспечивающей процесс распыления полимерного шнура из полиамида ПА6 диаметром 3 мм при различной тепловой мощности струи газа (таблица 3).

Таблица 3. – Значения скоростей газовой струи, необходимые для распыления шнура из полиамида

Наименование параметра	Тепловая мощность струи, кВт/м <sup>2</sup>					
	10	50	100	500	1000	5000
Скорость струи, м/с	5	30...40	72...74	440...480	1·10 <sup>3</sup>	(6...7)·10 <sup>3</sup>

Анализ результатов расчета скорости подачи шнура из полиамида и производительности процесса напыления для значений тепловых потоков от  $5 \cdot 10^4$  до  $5 \cdot 10^6$  Вт/м<sup>2</sup> (таблица 3) показывает, что отношение теплового потока распыляющей струи газа к ее скорости распространения в зоне плавления шнура должно удовлетворять значениям  $(0,8...1,3) \cdot 10^3$  Вт·с/м<sup>3</sup>. То есть при повышении тепловой мощности струи газа на каждые 100 кВт/м<sup>2</sup> необходимо увеличивать скорость ее распространения на 100 м/с. Таким образом, для оценочных расчетов можно записать, что необходимая взаимосвязь плотности теплового потока и скорости струи газа должна удовлетворять следующему выражению:

$$w_1 \approx (0,8...1,3) \cdot \frac{q}{10^3}. \quad (4)$$

Таблица 4. – Расчетные значения скорости подачи шнура и производительности процесса

Показатели процесса ГПН шнурами из полиамида	Тепловая мощность струи, кВт/м <sup>2</sup> / скорость струи, м/с					
	10/5	50/35	100/75	500/460	1000/100	5000/6500
Скорость подачи, м/с	–	0,0167	0,033	0,167	0,333	1,66
Производительность, кг/ч	–	0,425	0,85	4,25	8,5	42,5

Сравнение полученных расчетных значений необходимой скорости распыляющей струи (таблицы 3 и 4) с величинами скоростей распыляющих потоков, обеспечиваемыми известными конструкциями установок газопламенного напыления проволочными материалами, показывает, что известное оборудование невозможно использовать для процесса ГПН полимерных шнуров. Распыляющие струи установок ГПН металлических проволок при относительно высокой тепловой мощности (более  $10^6$  Вт/м<sup>2</sup>) обладают недостаточными динамическими характеристиками мощности (скорость 100...150 м/с).

Опыт газопламенного напыления полимерных порошковых покрытий свидетельствует о том, что в промышленности используются термораспылительные установки, обеспечивающие, как правило, мощность теплового потока в пределах 500...1000 кВт/м<sup>2</sup>. Из теоретического анализа следует, что в зоне плавления шнура при тепловой мощности струи газа не менее 500 кВт/м<sup>2</sup> она должна обладать скоростью не менее 440...480 м/с.

**Закключение.** Основываясь на том, что газовое пламя с достаточной для практики точностью можно считать конвективным теплообменным источником теплоты, проведен теоретический анализ процесса нагрева полимерного порошка в факеле пламени пропано-воздушной смеси и определен образующийся при взаимодействии частицы и факела удельный поток конвективной теплоотдачи, достаточный для проплавления частиц порошка, но не нагревающий их до температуры деструкции.

Теоретическая оценка величины плотности теплового потока при газопламенном напылении порошков из термопластичных полимеров показала, что для эффективного процесса формирования покрытий из полимеров с различными теплофизическими характеристиками необходим термораспылитель, обеспечивающий управление процессом теплообмена в системе «факел – частица полимера» плавной и точной регулировкой плотности теплового потока в пределах  $(1...3) \cdot 10^6$  Вт/м<sup>2</sup>.

Сформулировано основное требование, которому должен удовлетворять процесс ГПН покрытий шнурами из термопластичных полимеров, заключающееся в непрерывном удалении с поверхности шну-

ра образующегося слоя расплава. Одним из возможных технологических вариантов, удовлетворяющих этому требованию, выступает реализация процесса нагрева и распыления (диспергирования) одной струей газа, обладающей энергией, способной не только расплавлять полимер, но и формировать касательные напряжения на поверхности расплава, превышающие вязкость слоя этого расплава.

Выполнено моделирование процесса образования на поверхности шнура слоя расплава и его течение в зоне плавления. Получено выражение, определяющее связь между теплофизическими, динамическими параметрами струи газа и скоростью подачи полимерного шнура. Показано, что для значений тепловых потоков от  $5 \cdot 10^5$  до  $5 \cdot 10^6$  Вт/м<sup>2</sup> отношение теплового потока распыляющей струи газа к скорости ее движения в зоне плавления шнура должно составлять  $(0,8 \dots 1,3) \cdot 10^3$  Вт·с/м<sup>3</sup>. Расчетным путем установлено, что в зоне плавления шнура из полиамида ПА 6 струей газа с тепловой мощностью около 500 кВт/м<sup>2</sup> её скорость должна составлять около 500 м/с.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Протасов, В.Н. Теория и практика применения полимерных покрытий в оборудовании и сооружениях нефтегазовой отрасли / В.Н. Протасов. – М. : Недра, 2007. – 374 с.
2. Zhang, T. The influence of process parameters on the degradation of thermally sprayed polymer coatings / T. Zhang, D.T. Gawne, Y. Bao // Surface and Coatings Technology. – 1997. – № 96. – P. 337–344.
3. Thermoplastic Powder Coatings [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.dow.com/amplify/fab/thermoplastic.htm>. – Дата доступа: 21.11.2018.
4. Белоцерковский, М.А. Активированное газопламенное напыление покрытий порошками полимеров / М.А. Белоцерковский // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2007. – № 6. – С. 19–23.
5. Polymer Thermal Spray Coatings and Application Techniques // Bulletin Resodyn Corporation : Butte, Montana, USA. – 2013. – 29 p.
6. Довгяло, А.В. Композиционные материалы и покрытия на основе дисперсных полимеров. Технологические процессы / А.В. Довгяло, О.Р. Юркевич. – Минск : Наука і тэхніка, 1992. – 256 с.
7. Grainger, S. Engineering coatings: Design and application (Second edition) / S. Grainger, J. Blunt. – Sawston, Cambridge : Woodhead Publishing Limited, 2013. – 336 p.
8. Теория и практика нанесения защитных покрытий / П.А. Витязь [и др.]. – Минск : Беларус. навука, 1998. – 583 с.
9. Белоцерковский, М.А. Технологии активированного газопламенного напыления антифрикционных покрытий / М.А. Белоцерковский. – Минск : Технопринт, 2004. – 200 с.
10. Лыков, А.В. Теория теплопроводности / А.В. Лыков. – М. : Высш. шк., 1967. – 600 с.
11. Зубов, П.И. Структура и свойства полимерных покрытий / П.И. Зубов, Л.А. Сухарева. – М. : Химия, 1982. – 256 с.
12. Wicks, Z.W. Organic coatings. Science and technology / Z.W. Wicks, F.N., Jones, S.P. Pappas. – Chichester : John Wiley & Sons Ltd. – 1994. – Vol. 2. – 438 p.
13. Рыкалин, Н.Н. Высокотемпературные технологические процессы: теплофизические основы / Н.Н. Рыкалин, А.А. Углов, Л.М. Анищенко. – М. : Наука, 1985. – 176 с.
14. Химическая гидродинамика / А.М. Кутепов [и др.]. – М. : Квантум, 1996. – 336 с.
15. Калинин, В.В. Влияние поверхностных сил на гидродинамику растекания капель жидкости и капиллярные течения : дис. ... д-ра физ.-мат. наук : 01.02.05 ; РГУ Нефти и газа им. М.М. Губкина / В.В. Калинин. – М., 2002. – 289 с.

Поступила 06.02.2019

#### ANALYTICAL ASSESSMENT OF NECESSARY PARAMETERS FLAME JET DURING DEPOSITION OF POLYMER COATINGS

M. BELOTSERKOVSKY

*The process of heating the polymer powder and the polymer cord in the flame of propane-air mixture is analyzed. A theoretical estimation of the heat flux density during flame spraying of powders from thermoplastic polymers is carried out. The physical model of the process of flame spraying of polymer cords is considered. An expression is obtained that determines the relationship between the thermophysical, dynamic parameters of the gas jet and the feed rate of the polymer cord.*

**Keywords:** flame spraying, powders of thermoplastic polymers, spraying of polymer cords, thermophysical parameters of the torch.

УДК 538.9+539.23

**СТРУКТУРНО-ФАЗОВОЕ СОСТОЯНИЕ И АДГЕЗИОННАЯ ПРОЧНОСТЬ ПОКРЫТИЙ CrN И TiCrN, СФОРМИРОВАННЫХ МЕТОДОМ ВАКУУМНО-ДУГОВОГО ОСАЖДЕНИЯ**

*д-р физ.-мат. наук, проф. В.А. КУКАРЕКО; А.В. КУШНЕРОВ*  
(Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, Минск);  
*д-р физ.-мат. наук, чл.-корр. НАН Беларуси Ф.Ф. КОМАРОВ; С.В. КОНСТАНТИНОВ*  
(Институт прикладных физических проблем им. А.Н. Севченко, БГУ, Минск);  
*канд. физ.-мат. наук В.Е. СТРЕЛЬНИЦКИЙ*  
(Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт», Украина)

*Исследовано структурно-фазовое состояние и определена нагрузка, при которой происходит отслаивание покрытий CrN и TiCrN, сформированных методом вакуумно-дугового осаждения на подложках из стали 12X18H10T и сплава Zr2,5%Nb. Установлено, что покрытие TiCrN имеет однофазную структуру (Ti,Cr)N с гранецентрированной кубической кристаллической решеткой, а покрытие CrN состоит из нитрида хрома CrN. Покрытие TiCrN вследствие его легированности атомами Ti имеет более высокую нагрузку отслаивания по сравнению с покрытием CrN. При этом у покрытия TiCrN нагрузка отслаивания от подложки из сплава Zr2,5%Nb примерно в 2 раза выше, чем от подложки из стали 12X18H10T. Показано, что покрытие CrN, напротив, выдерживает большие нагрузки до отслаивания от подложки из стали 12X18H10T, чем от сплава Zr2,5%Nb.*

**Ключевые слова:** *покрытия, структурно-фазовое состояние, подложка, адгезионная прочность, отслаивание, вакуумно-дуговое осаждение.*

**Введение.** Развитие атомной промышленности, ядерной энергетики и космической техники требует разработки радиационно-стойких материалов и электронного оборудования, способных работать в условиях воздействия ионизирующих излучений. Вместе с тем кардинальное изменение эксплуатационных свойств применяемых массивных конструкционных материалов – крайне сложный и зачастую дорогостоящий проект. Использование защитных покрытий позволяет объединить свойства подложки и самого покрытия и получить поверхностную слоистую композицию, обладающую характеристиками, которые не могут быть достигнуты при использовании одного материала. Повышенной стойкостью к ионизирующим излучениям обладают нитридные керамики, в частности нитриды переходных металлов [1]. Такими материалами являются покрытия из нитридов титана, хрома, алюминия или их композитов, которые имеют улучшенные характеристики (повышенные твердость, износостойкость, коррозионную и термическую устойчивость) благодаря формированию в них нанокристаллической структуры [2; 3]. Перспективным способом получения наноструктурных покрытий выступают методы вакуумно-дугового осаждения из фильтрованной плазмы [4; 5]. Основным критерием качества покрытий считается адгезия материала к подложке. Фактором, в большей степени влияющим на эксплуатационные свойства, является адгезионная способность покрытия [6]. Для оценки адгезионных свойств между покрытием и подложкой применяется метод склерометрии [7]. Величину адгезии характеризуют критической нагрузкой, при которой происходит отслоение покрытия.

Цель работы заключается в исследовании структурно-фазового состояния и определении нагрузки разрушения покрытий CrN и TiCrN, нанесенных на различные подложки.

**Материалы и методы исследования.** Объект исследования – образцы покрытий CrN и TiCrN, сформированные методом сепарируемого вакуумно-дугового осаждения на подложках из стали 12X18H10T и сплава Zr2,5%Nb. Толщина покрытий – 2,5...5,6 мкм.

Исследование структурно-фазового состояния покрытий CrN и TiCrN осуществлялось на дифрактометре ДРОН-3.0 в монохроматизированном кобальтовом ( $CoK_{\alpha}$ ) излучении при напряжении 28 кВ и анодном токе 14 мА. Расшифровка рентгенограмм производилась при помощи программного обеспечения Crystallographica Search-Match с картотекой PDF-2.

Измерения микротвердости по Виккерсу выполнялись на твердомере DuraScan 20 методом восстановленного отпечатка по ГОСТ 9450-76 при нагрузке на индентор 25 г.

Для определения нагрузки разрушения покрытий CrN и TiCrN от подложки проводились испытания методом скретч-тестирования на трибометре MFT-5000. К поверхности образца с покрытием подводился индентор Роквелла, алмазный наконечник с радиусом при вершине 20 мкм и углом 120°. Далее индентор перемещался по испытываемой поверхности на расстояние 7 мм и одновременно прикладывалась постепенно увеличивающаяся нагрузка в пределах от 0 до 98 Н. В итоге на поверхности формировалась канавка (царапина) переменной глубины. Скорость нагрузки индентора и скорость царапания (перемещения индентора с увеличивающейся нагрузкой) составляла 14 Н/мин и 1 мм/мин соответственно. Реги-

страция коэффициента трения и нагрузки разрушения проводилась с помощью программного обеспечения MFT, поставляемого вместе с трибометром MFT-5000.

**Результаты и их обсуждение.** Рентгеновские дифрактограммы покрытий CrN и TiCrN, нанесенных на подложки из стали 12X18H10T и сплава Zr2,5%Nb, представлены на рисунке 1.

При исследовании покрытия CrN установлено, что покрытие имеет однофазную структуру и состоит из фазы CrN с гранцентрированной кубической решеткой типа NaCl. Параметр кристаллической решетки фазы CrN ( $a$ ) составляет 0,4225 нм для покрытия CrN, нанесенного на сталь 12X18H10T, и 0,4222 нм для того же покрытия, нанесенного на сплав Zr2,5%Nb. Микротвёрдость покрытия CrN составляет 1900...2000 HV0,025. В покрытии TiCrN присутствует нитридная фаза (Ti, Cr)N с кристаллической решеткой типа NaCl. При этом значения параметров ( $a$ ) кристаллической решетки фазы (Ti,Cr)N покрытия TiCrN, нанесенного на сталь 12X18H10T и сплав Zr2,5%Nb, составляют 0,4270 и 0,4263 нм соответственно. Покрытие TiCrN имеет ярко выраженную текстурированность типа (110). Микротвёрдость покрытия TiCrN составила 3000...3300 HV0,025. На дифрактограммах исследуемых покрытий присутствуют дифракционные линии фаз  $\alpha$ -Zr и  $\gamma$ -Fe от подложек.

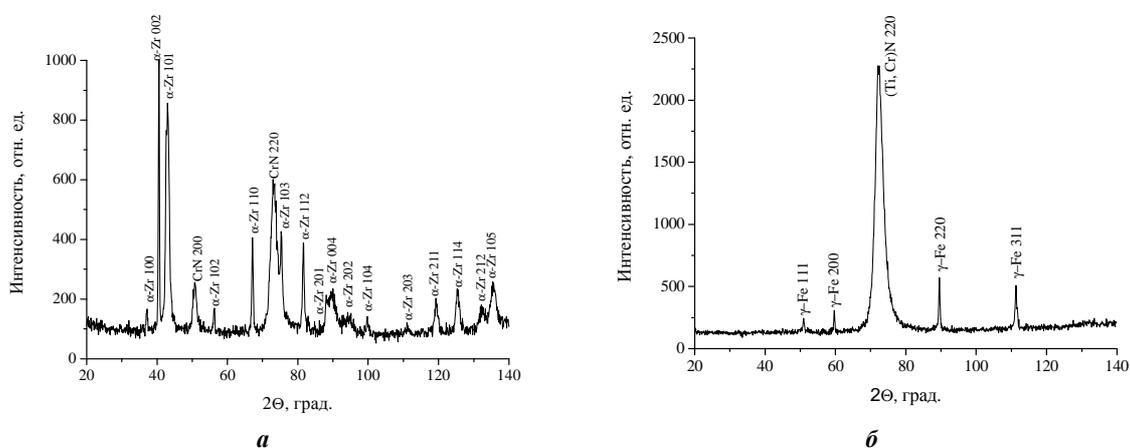


Рисунок 1. – Фрагменты рентгеновских дифрактограмм ( $\text{CoK}\alpha$ ) от поверхностного слоя покрытия CrN, осажденного на сплав Zr2,5%Nb (а) и покрытия TiCrN, осажденного на сталь 12X18H10T (б)

На рисунке 2 показаны царапины, полученные при скретч-тестировании покрытий CrN и TiCrN, из которого видно, что при достижении определенной нагрузки вдавливания алмазного индентора происходит отслаивание покрытия от подложки, сопровождающееся появлением характерных следов в виде сколов на микрофотоснимках царапин.

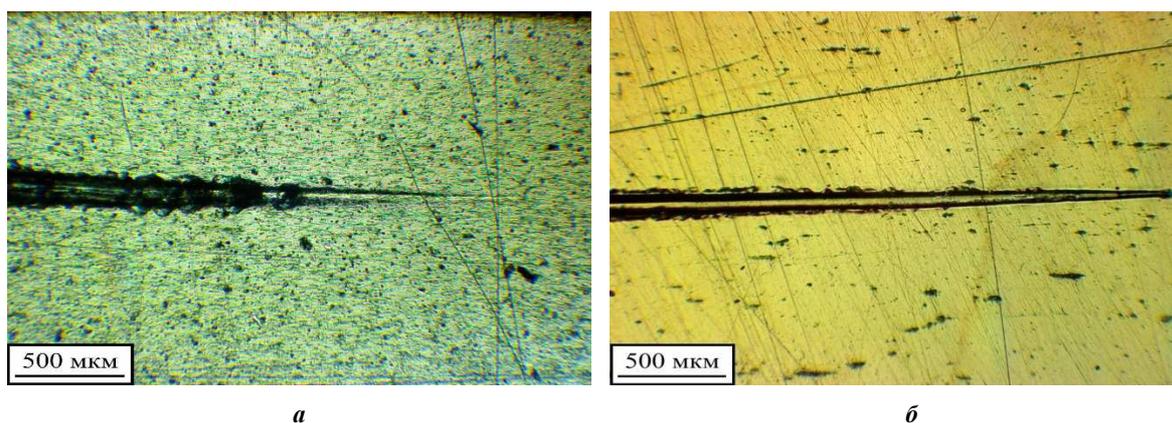


Рисунок 2. – Внешний вид царапин, полученных в результате скретч-тестирования покрытия CrN на подложке Zr2,5%Nb (а) и покрытия TiCrN на подложке 12X18H10T (б)

Графические зависимости коэффициента трения, нагрузки вдавливания и акустической эмиссии от времени испытания покрытий представлены на рисунке 3. По результатам регистрации акустической эмиссии определена нагрузка разрушения (отслаивания) покрытия, которая фиксируется по первым всплескам акустической эмиссии. Для покрытия CrN, нанесенного на подложку 12X18H10T, нагрузка разрушения составила 15 Н; для случая CrN, нанесенного на подложку Zr2,5%Nb, нагрузка разрушения – 13 Н.

В случае покрытия TiCrN, сформированного на подложке 12X18H10T, нагрузки отслаивания составили 20...22 Н. Для покрытия TiCrN, нанесенного на подложку Zr2,5%Nb, величина нагрузки разрушения возрастает до 36...38 Н.

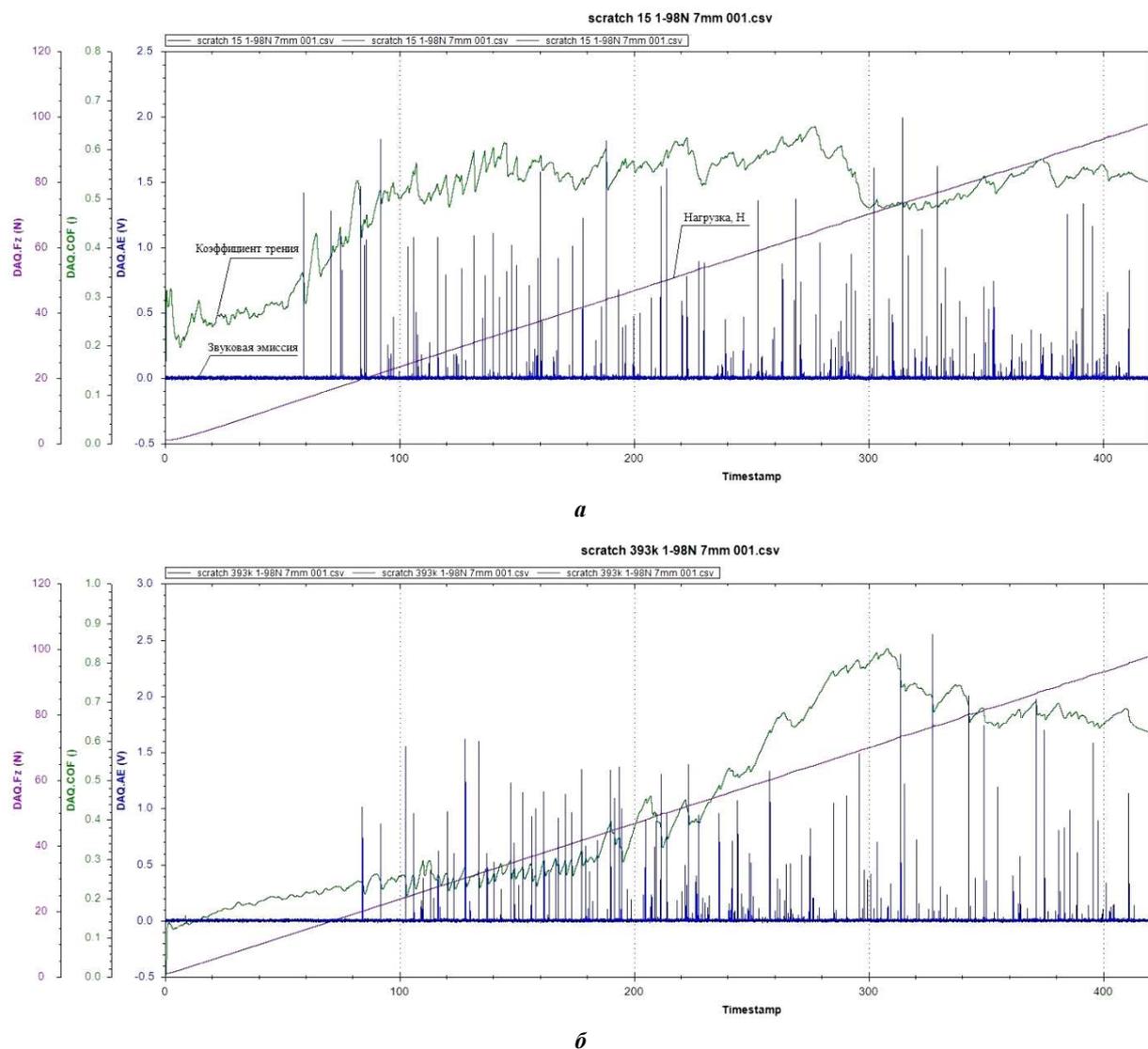


Рисунок 3. – Зависимость акустической эмиссии, коэффициента трения, нагрузки на индентор от времени испытаний для покрытий: CrN на подложке Zr2,5%Nb (а), TiCrN на подложке 12X18H10T (б)

Коэффициент трения ( $f$ ) в момент отслаивания покрытия CrN от подложки составил 0,17...0,30, для покрытий TiCrN – 0,20...0,21. При дальнейшем увеличении нагрузки вдавливания происходит увеличение коэффициента трения. При нагрузке  $\geq 50$  Н наблюдается углубление алмазного индентора в подложку, а значение коэффициента трения выходит на уровень  $\approx 0,45$  для подложки из стали 12X18H10T и  $\approx 0,50$  для сплава Zr2,5%Nb. Значения коэффициента трения в момент отслаивания покрытия и нагрузки отслаивания покрытий TiCrN и CrN представлены в таблице 1.

Таблица 1. – Значения коэффициента трения ( $f$ ) и нагрузки отслаивания ( $L_c$ ) покрытий CrN и TiCrN

Покрытие	Подложка	Параметры	
		$f$	$L_c$ , Н
CrN	12X18H10T	0,17	15
	Zr2,5%Nb	0,30	13
TiCrN	12X18H10T	0,20	21
	Zr2,5%Nb	0,21	38

Таким образом, покрытие TiCrN, нанесенное на сплав Zr2,5%Nb, имеет большую нагрузку отслаивания, чем это же покрытие, нанесенное на подложку из стали 12X18H10T. Данное явление связано, по нашему мнению, с тем, что титан и цирконий принадлежат к элементам одной IVB подгруппы периодической системы Менделеева, что свидетельствует о химическом родстве этих элементов, обусловленном подобием строения их электронных оболочек. Последнее является условием для образования непрерывных твердых растворов [8], что приводит к увеличению сил связи между покрытием TiCrN и сплавом Zr2,5%Nb и возрастанию адгезионной прочности покрытия. Покрытие CrN на стали 12X18H10T характеризуется меньшей адгезионной прочностью, чем покрытие TiCrN на этой стали, о чем свидетельствует меньшая нагрузка отслаивания покрытия, составляющая 15 Н. Нагрузка отслаивания покрытия CrN на сплаве Zr2,5%Nb минимальная – составляет 13 Н.

**Заключение.** В результате проведенного исследования структурно-фазового состояния и адгезионной прочности вакуумно-дуговых покрытий CrN и TiCrN, сформированных на подложке из сплава Zr2,5%Nb и на стали 12X18H10T, установлено, что покрытие CrN состоит из фазы CrN, а покрытие TiCrN – из фазы (TiCr)N, имеющих гранецентрированную кубическую решетку типа NaCl. Показано, что исследуемое покрытие TiCrN имеет большую нагрузку отслаивания по сравнению с покрытием CrN на всех подложках. При этом в случае покрытия CrN – нагрузка отслаивания покрытия от стали 12X18H10T больше, чем от сплава Zr2,5%Nb. Покрытие TiCrN имеет наибольшую нагрузку отслаивания, что говорит о лучших адгезионных свойствах покрытия TiCrN, чем покрытия CrN. Сделан вывод, что повышенная адгезионная прочность между покрытием TiCrN и подложкой из сплава Zr2,5%Nb, возможно, связана с образованием непрерывных твердых растворов между элементами Ti и Zr.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Present status of study on development of materials resistant to radiation and beam impact / M. Kawai [et al.] // Journal of Nuclear Materials. – 2008. – Vol. 377. – P. 21–27.
2. Musil, J. Hard nanocomposite coatings: Thermal stability, oxidation resistance and toughness / J. Musil // Surface and Coatings Technology. – 2012. – Vol. 207. – P. 50–65.
3. Gleiter, H. Nanocrystalline materials / H. Gleiter // Progress in Materials Science. – 1989. – Vol. 33. – P. 223–315.
4. Ivasishin, O.M. Nanostructured layers and coating formed by ion-plasma fluxes in titanium alloys and steels / O.M. Ivasishin, A.D. Pogrebnyak, S.N. Bratushka. – Kyiv : Akadempriodyka, 2011. – 285 p.
5. Вакуумно-плазменные покрытия на основе многоэлементных нитридов / Н.А. Азаренков [и др.] // Металлофизика и новейшие технологии. – 2013. – 35, № 8. – P. 1061–1084.
6. Константинов, В.М. Адгезия покрытий Ti-N на модифицированной стальной подложке / В.М. Константинов, Г.А. Ткаченко, А.В. Ковальчук // Металлургия : респ. межведомств. сб. науч. тр. – Минск : БНТУ, 2014. – Вып. 35. – С. 272–281.
7. Кравчук, К.С. Измерение трибологических свойств покрытий и композиционных материалов на субмикронном и нанометровом масштабах : дис. ... канд. техн. наук / К.С. Кравчук. – М., 2015. – 138 с.
8. Федотов, А.К. Физическое материаловедение : учеб. пособие : в 3-х ч. / А.К. Федотов. – Минск : Выш. шк., 2012. – Ч. 2 : Фазовые превращения в металлах и сплавах. – 446 с.

Поступила 18.02.2019

#### STRUCTURAL-PHASE STATE AND ADHESIVE STRENGTH VACUUM-ARC DEPOSITION CRN AND TICRN COATINGS

V. KUKAREKO, A. KUSHNEROU,  
F. KOMAROV, S. KONSTANTINOV, V. STRELNITSKIJ

*The structural-phase state was investigated and the load was determined at which the tearing of CrN and TiCrN coatings formed by vacuum arc deposition on substrates of 12X18H10T steel and Zr2,5%Nb alloy occurs. It is established that the TiCrN coating has a single-phase structure (Ti,Cr)N with a face-centered cubic crystal lattice, and the CrN coating consists of chromium nitride CrN. The TiCrN coating, due to its alloying with Ti atoms, has a higher tearing load compared to the CrN coating. At the same time, in the TiCrN coating, the tearing load from the substrate made of Zr2,5%Nb alloy is ≈2 times greater than that from the substrate made of steel 12X18H10T. It is shown that the CrN coating, on the contrary, can withstand heavy loads before tearing from a substrate of 12X18H10T steel than from a Zr2,5%Nb alloy.*

**Keywords:** coatings, structural-phase state, substrate, adhesive strength, exfoliation, vacuum-arc deposition.

УДК 614.846.63:004.94

**ЭКСПЛУАТАЦИОННАЯ НАДЁЖНОСТЬ ЦИСТЕРН ПОЖАРНЫХ АВТОМОБИЛЕЙ:  
МОДЕРНИЗАЦИЯ СТАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ  
В ЦЕЛЯХ ПОВЫШЕНИЯ ИХ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК****С.Г. КОРОТКЕВИЧ***(Университет гражданской защиты МЧС Беларуси, Минск);**д-р техн. наук, проф. В.А. КОВТУН**(Гомельский филиал Университета гражданской защиты МЧС Беларуси)*

*Опираясь на анализ применения аварийно-спасательной техники на территории Республики Беларусь, определена основная техническая единица в привлечении к ликвидации чрезвычайных ситуаций – пожарная автоцистерна. Установлено, что в большинстве случаев причина её ремонта и вывода из боевого расчёта заключается в нарушении герметичности цистерны. С применением подходов адаптивного компьютерного моделирования проведены исследования напряжённо-деформированного состояния и выполнена оценка прочностных свойств конструкции цистерны пожарного автомобиля. В целях оптимизации существующей конструкции по критерию коэффициента запаса прочности выполнены проектные расчёты, на основе которых разработаны рекомендации по модернизации конструкции цистерны в целях повышения её эксплуатационной надёжности и увеличения межремонтного периода обслуживания.*

**Ключевые слова:** *пожарный автомобиль, цистерна, напряжения, компьютерное моделирование, проектирование, сварное соединение, запас прочности.*

**Введение.** В настоящее время проведение и реализация мероприятий по обновлению и модернизации пожарной аварийно-спасательной техники – одна из приоритетных задач Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь. Статистика работы пожарных аварийно-спасательных подразделений свидетельствует о том, что 98% от общего числа погибших приходится на начальный период развития пожаров и чрезвычайных ситуаций, а основной привлекаемой техникой служит пожарная автоцистерна [1].

Анализ записей в журналах учёта технического обслуживания и ремонта техники производственно-технических центров Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь позволил установить, что одна из частых причин нахождения в ремонте пожарного автомобиля – нарушение герметичности цистерны [2].

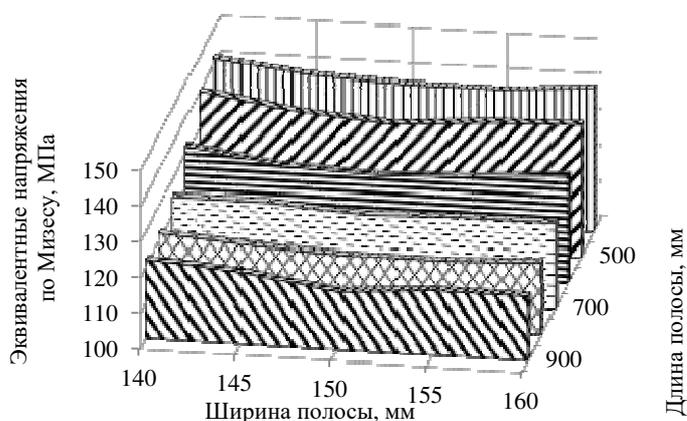
Конструкция цистерны представляет собой ёмкость прямоугольного сечения, образованного передней, задней, боковыми, верхней и нижней стенками. Внутри расположены рёбра жесткости, продольные и поперечные волноломы. Основное отличие от других автомобилей, имеющих ёмкости для жидкости, заключается в необходимости обеспечения повышенных требований к прочности конструкции цистерны. Это обусловлено необходимостью следовать к месту вызова на пожар не только по асфальтированным, но и просёлочным дорогам. Пожары нередко возникают в лесах, кустарниках, торфяниках, подъезд к которым затруднён из-за отсутствия ровного дорожного покрытия для такой крупногабаритной техники. В таких условиях при движении корпус испытывает осевые и динамические воздействия, что передаёт значительные, часто критические нагрузки на конструкцию цистерны. В результате особых эксплуатационных режимов при движении на ликвидацию чрезвычайных ситуаций в конструкции цистерны появляются трещины в угловых сварных соединениях стенок цистерны и в угловых сварных соединениях волноломов. Устранение данных повреждений требует большого объёма подготовительных и ремонтных работ, которые ведут к простоев техники в течение продолжительного времени [3–4]. В условиях ограниченного финансирования поддержание оперативных возможностей и ресурса парка пожарных автоцистерн – одна из актуальных задач Министерства по чрезвычайным ситуациям.

**Основная часть.** Для достижения поставленной цели работы использован методологический подход, основанный на совокупном использовании результатов экспериментальных измерений и компьютерного моделирования. Исследование напряжённо-деформированного состояния цистерны пожарного автомобиля проведено с использованием методов компьютерного моделирования. В качестве средства расчета использовался программный продукт ANSYS. В качестве исходных параметров моделирования использовались геометрические размеры деталей цистерны, физико-механические характеристики материалов и предварительно измеренные значения ускорения, возникающего от вибрации конструктивных элементов при движении [5].

Для проведения эксперимента была выбрана цистерна объёмом 5 м<sup>3</sup> пожарного автомобиля на шасси МАЗ-5337, как наиболее распространённая в эксплуатации и уже вышедшая из гарантийного периода обслуживания. Порядок проведения испытаний, разработки компьютерной модели и расчёта в программном продукте ANSYS описаны в научных работах [2; 6; 7]. Анализ полученных результатов

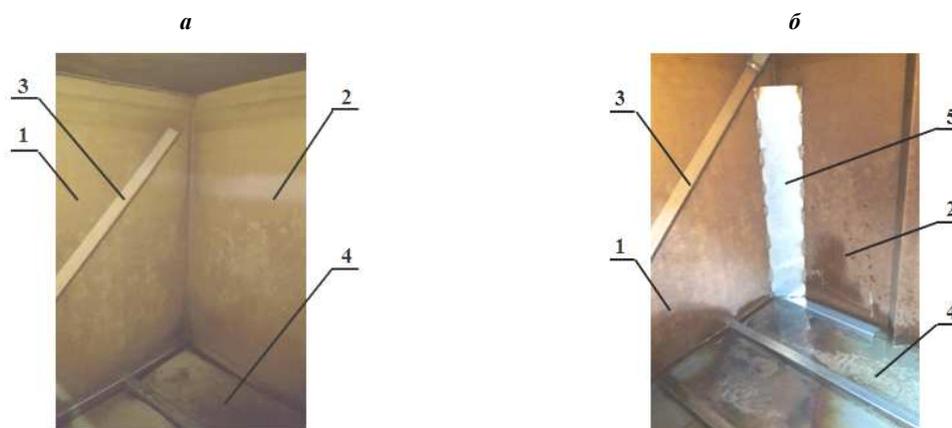
в ходе компьютерного моделирования в программном комплексе ANSYS позволил определить области возникновения максимальных эквивалентных напряжений по Мизесу в конструкции цистерны пожарного автомобиля. Данные области соответствуют: угловым сварным соединениям передней, задней и боковых стенок цистерны, в которых  $\sigma_{\max}$  равны  $145 \pm 10$  МПа; угловым сварным соединениям волноломов к стенкам цистерны, в которых  $\sigma_{\max}$  составляют  $136 \pm 9$  МПа; нахлесточным сварным соединениям ребер жёсткости на боковых стенках цистерны, в которых  $\sigma_{\max}$  равны  $148 \pm 10$  МПа. Полученные результаты хорошо согласуются со сведениями о проблемных местах в конструкциях цистерн данного типа.

В целях снижения возникающих нагрузок в угловых сварных соединениях стенок цистерны пожарного автомобиля предложена дополнительная установка косынок в виде полосы, расположенных в вертикальной плоскости под углом 45 градусов к находящимся в контакте стенкам цистерны. При расчёте в программном комплексе ANSYS установлена зависимость возникающих значений эквивалентных напряжений по Мизесу в угловом сварном соединении цистерны от конструктивного исполнения устанавливаемой косынки (рисунок 1). Оптимизируемыми параметрами косынки служили длина и ширина при постоянной толщине. В результате сравнения различных вариантов конструктивного исполнения косынки в виде полосы при проведении сравнительных расчётов установлены наиболее оптимальные геометрические размеры – длина и ширина, соответственно равные 900 и 150 мм. Данное решение позволило снизить возникающие напряжения на 21% ( $29 \pm 4$ ) МПа.



**Рисунок 1. – Зависимость эквивалентных напряжений по Мизесу от конструктивных размеров косынки в виде полосы, устанавливаемой в угловом сварном соединении стенок цистерны**

На рисунке 2, *а* представлен фотоснимок углового сварного соединения боковой и задней стенки цистерны заводского исполнения; на рисунке 2, *б* – фотоснимок углового сварного соединения боковой и задней стенок модернизированной цистерны с установленным дополнительным элементом в виде косынки.



**1 – боковая стенка цистерны; 2 – задняя стенка цистерны;  
3 – ребро жесткости на боковой стенке цистерны; 4 – дно цистерны; 5 – косынка**

**Рисунок 2. – Фрагмент внутреннего углового сварного соединения боковой и задней стенок цистерны до изменений (*а*), после изменений (*б*)**

Дальнейшие исследования по влиянию конструкционного исполнения цистерны объемом  $5 \text{ м}^3$  пожарного автомобиля на шасси МАЗ-5337 на её напряжённо-деформированное состояние позволили определить целесообразность увеличения длины ребра жёсткости, установленного на боковых стенках конструкции цистерны. Зависимость возникающих значений эквивалентных напряжений по Мизесу от длины ребра жёсткости, расположенного на боковых стенках конструкции цистерны, представлены на рисунке 3.

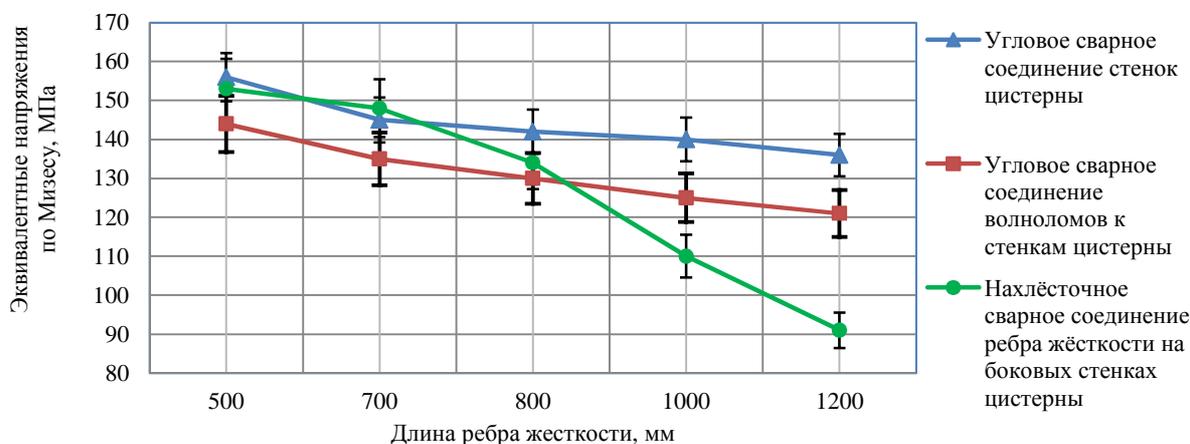
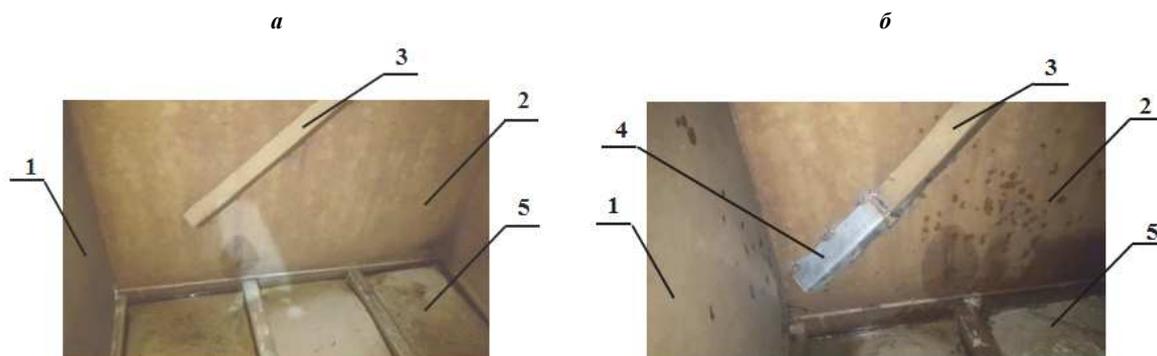


Рисунок 3. – Зависимость эквивалентных напряжений по Мизесу от длины ребра жёсткости, расположенного на боковых стенках цистерны

В результате выполненных расчётов установлено, что увеличение длины ребра жёсткости с 700 мм (заводское исполнение) до его максимальной величины 1200 мм позволяет снизить возникающие напряжения в угловых сварных соединениях стенок цистерны на 5,5% ( $9 \pm 3$ ) МПа. При этом выявлено, что также снижаются возникающие напряжения в угловых сварных соединениях волноломов к стенкам цистерны на 10% ( $14 \pm 3$  МПа) и в местах крепления концевых участков рёбер жёсткости к боковым стенкам цистерны на 38% ( $57 \pm 5$  МПа). Следует отметить, что при уменьшении длины ребра жёсткости на боковых стенках цистерны пожарного автомобиля наблюдается резкое увеличение напряжений в угловых сварных соединениях стенок цистерны.

На рисунке 4, *а* представлен фотоснимок внутреннего расположения ребра жёсткости на боковой стенке цистерны заводского исполнения; на рисунке 4, *б* – фотоснимок внутреннего расположения ребра жёсткости на боковой стенке модернизированной цистерны.



1 – поперечный волнолом; 2 – боковая стенка цистерны; 3 – ребро жесткости на боковой стенке цистерны; 4 – доработанная часть ребра жесткости; 5 – дно цистерны

Рисунок 4. – Фрагмент внутреннего расположения ребра жёсткости на боковой стенке цистерны до изменений (*а*), после изменений (*б*)

В таблице представлены результаты компьютерного расчёта заводского исполнения конструкции цистерны объемом  $5 \text{ м}^3$  пожарного автомобиля на шасси МАЗ-5337 и модернизированной, с установленными конструкционными дополнениями.

Сравнительный анализ показал значительное повышение коэффициента запаса прочности и снижение напряжённо-деформированного состояния. Также представлены значения коэффициента запаса прочности в исследуемых областях цистерны, что позволяет судить о надёжности конструкции, способ-

ности выдерживать рабочие нагрузки и, как следствие, о необходимости внесения изменений в конструкцию. При этом необходимо отметить, что рекомендованные значения коэффициентов запаса прочности для пожарных автоцистерн в специальной литературе отсутствуют [8–11], а их выбор осуществляется на основе опыта эксплуатации аналогичных изделий, а значения колеблются в диапазоне 1,7...1,8. Также при определении допускаемых напряжений для сварных швов используется понижающий коэффициент, равный 0,8...0,85, который учитывает то, что в околошовной зоне снижаются механические характеристики основного металла [12], а доступными видами контроля сварных швов являются лишь визуальный и испытания гидростатическим давлением [13; 14].

Таблица. – Результаты исследований возникающих напряжений в конструкции цистерны объёмом 5 м<sup>3</sup> пожарного автомобиля на шасси МАЗ-5337

Область максимальных значений эквивалентных напряжений по Мизесу в конструкции цистерны	Заводское исполнение конструкции цистерны		Модернизированная конструкция цистерны	
	$\sigma_{\max}$ , МПа	Запас прочности, $n$	$\sigma_{\max}$ , МПа	Запас прочности, $n$
Угловые сварные соединения передней, задней и боковых стенок цистерны	145 ± 10	1,17	107 ± 7	1,57
Угловые сварные соединения волноломов к передней, задней и боковым стенкам цистерны	136 ± 9	1,23	122 ± 8	1,36
Нахлесточные сварные соединения ребра жёсткости на боковых стенках цистерны	148 ± 10	1,15	91 ± 5	1,87

Проведенные исследования позволили разработать новые конструкторские решения для цистерн пожарных автомобилей, защищенные патентом Республики Беларусь [15].

Проведение подробного анализа результатов компьютерного моделирования ещё на стадии проектирования позволяет оценить и спрогнозировать состояние расчётной конструкции в зависимости от различных режимов эксплуатации, а также даёт возможность разрабатывать необходимые конструкционные изменения. Используемый методологический подход адаптивного компьютерного моделирования, основанный на научно обоснованных подходах к прогнозированию состояния конструкций пожарных автоцистерн, может быть использован для решения задач по повышению эксплуатационной надёжности различных ёмкостей для перевозки жидкости.

**Заключение.** По полученным результатам проведённых исследований можно сделать следующие выводы:

- анализ применяемой аварийно-спасательной техники на территории Республики Беларусь и её технического состояния позволил установить, что основной технической единицей в привлечении к ликвидации чрезвычайных ситуаций является пожарная автоцистерна, а одной из встречающихся причин её ремонта и вывода из боевого расчёта – нарушение герметичности цистерны для жидкости;
- при расчёте в программном комплексе ANSYS установлены зависимости влияния размерного фактора конструктивных элементов цистерн ПА объёмом 5 м<sup>3</sup> на шасси МАЗ-5337 на напряженно-деформированное состояние;
- проведены прочностные расчёты цистерны объёмом 5 м<sup>3</sup> пожарного автомобиля на шасси МАЗ-5337, на основе которых определены оптимальные размеры составляющих конструктивных элементов, что позволило разработать рекомендации для модернизации данной цистерны;
- внедрение и практическая комплексная реализация данных рекомендаций позволила повысить эксплуатационную надёжность конструкции цистерны на более чем 30%, увеличив тем самым её межремонтный период.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Казябо, В.А. Концепция оснащения подразделений по чрезвычайным ситуациям пожарной аварийно-спасательной техникой / В.А. Казябо, Ю.И. Шавель, И.Н. Гончаров ; НИИ ПБ и ПЧС // Сборник отчётов о НИР. – С. 4–9.
2. Короткевич, С.Г. Исследование напряженно-деформированного состояния конструкций цистерн пожарных автомобилей / С.Г. Короткевич, В.А. Ковтун // Вестн. Воронеж. ин-та ГПС МЧС России. – 2017. – № 4 (25). – С. 45–51.
3. Беспалько, С.В. Разработка и анализ моделей повреждающих воздействий на котлы цистерн для перевозки криогенных продуктов: дис. ... д-ра техн. наук : 05.22.07 / С.В. Беспалько. – М., 2000. – 427 с.
4. Безухов, Н.И. Основы теории упругости, пластичности и ползучести / Н.И. Безухов. – Минск : Вышш. школа, 1993. – 512 с.

5. Методика динамического моделирования напряжённо-деформированного состояния элементов и узлов конструкций оболочечного типа. – Гомель : ГФ УГЗ МЧС Респ. Беларусь, 2017. – 8 с.
6. Короткевич, С.Г. Компьютерное моделирование и исследование напряжённо-деформированного состояния конструкций цистерн пожарных автомобилей / С.Г. Короткевич, В.А. Ковтун, В.А. Жаранов // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. – 2018. – № 1. – С. 81–90.
7. Короткевич, С.Г. Прогнозирование эксплуатационной надёжности пожарных автоцистерн с применением подходов компьютерного моделирования / С.Г. Короткевич, В.А. Ковтун // Горение и проблемы тушения пожаров : материалы междунар. науч.-практ. конф., Москва, 5 июля 2017 г. : в 2 ч. – М. : ВНИИПО, 2017. – Ч. 2. – С. 437–439.
8. Пояркова, К.В. Оценка дефектности структуры сварных соединений по наличию неметаллических включений / К.В. Пояркова, И.Р. Кузеев, К.Л. Забелин // Машиностроение : сетевой электрон. науч. журн. – 2017. – № 2 (5). – С. 32–35.
9. Расчеты машиностроительных конструкций методом конечных элементов : справочник / В.И. Мяченков [и др.]. – М. : Машиностроение, 1989. – 520 с.
10. Хренов, К.К. Сварка, резка и пайка металлов. Справочник. – М., 2013. – 385 с.
11. Бенерджи, П.В. Методы граничных элементов в прикладных науках / П.В. Бенерджи, Р.И. Баттерфилд. – М. : Мир, 1984. – 494 с.
12. Детали машин в примерах и задачах : учеб. пособие / С.Н. Ничипорчик, М.И. Корженцевский, В.Ф. Калачёв ; под ред. С.Н. Ничипорчик. – 2-е изд. – М. : Высш. школа, 1981. – 186 с.
13. Воропай, В.С. Экспериментальные исследования технического состояния вагонов-цистерн / В.С. Воропай // Сборник научных работ ДонИЖТ. – 2010. – № 23. – С. 76–85.
14. Головченко, В.И. Проверка прочности элементов крепления цистерны к шасси автотопливозаправщика от смещения при действии продольной нагрузки / В.И. Головченко, Н.Л. Иванина // Вестник НТУ «ХПИ». – 2012. – № 1 (975). – С. 22–35.
15. Пожарная цистерна : решение от 18.05.2018 о выдаче патента по заявке ВУ № и 20180041 на полезную модель / В.А. Ковтун, С.Г. Короткевич, В.Н. Пасовец ; заявитель Университет гражданской защиты МЧС Беларуси ; заявл. 12.02.2018.

Поступила 01.11.2018

**OPERATIONAL SAFETY OF FIRE TRUCK'S TANK :  
MODERNIZATION OF STEEL STRUCTURES FOR THE PURPOSE  
OF MECHANICAL CHARACTERISTICS MAINTENANCE**

**S. KOROTKEVICH, V. KOVTUN**

*A fire truck is the main technical unit engaged in emergency recovery. It was established on the analysis basis of the of the emergency rescue equipment use in the territory of the Republic of Belarus. In the majority of cases the reason for fire truck's repair and decommissioning is pressurisation leakage. With the use of adaptive computer modelling approaches, the studies of the stress-strain state were carried out and the strength properties of the tank design of a fire engine were evaluated. In order to optimise the existing construction design according to the criterion of the safety factor, the design calculations have been made. On the basis of mentioned above calculations, the recommendations for the tank design upgrading have been developed. Its purpose is to improve the operational reliability and to enhance the maintenance time between repairs.*

**Keywords:** fire truck, tank, deformation, computer simulation, design, welded joint, safety factor.

УДК 621.434-242.004.67

## АЛЬТЕРНАТИВНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ РЕМОНТА РОТОРНОЙ ГРУППЫ НАСОС-МОТОРОВ

канд. техн. наук, доц. В.А. ФРУЦКИЙ; канд. техн. наук, доц. С.В. ПИЛИПЕНКО  
(Полоцкий государственный университет)

*Анализируются основные методы восстановления параметров рабочих поверхностей вкладышей подшипников скольжения роторной группы насосов высокого давления и насос-моторов. Предложен авторский метод восстановления вкладышей вала насос-мотора, согласно которому восстановление проводится наплавкой и напылением. Проанализированы возможности применения различных вариантов покрытий. Выполнен сравнительный анализ методов получения покрытий и их свойств. Проведено сравнение получаемых покрытий с известными свойствами покрытий из антифрикционных бронз.*

**Ключевые слова:** износостойкость, восстановление, вкладыши, подшипники скольжения, насос-моторы, роторная группа.

**Введение.** Решение задачи увеличения несущей способности подшипников и увеличения их износостойкости является проблемой, которая исследуется в ряде научных работ [1–3]. К материалам подшипников скольжения предъявляются высокие, однако в какой-то мере противоречивые требования: усталостная прочность; сопротивление схватыванию (совместимость); износостойкость; прирабатываемость; абсорбционная способность; коррозионная стойкость; кавитационная стойкость [3]. Выработка и выход из строя подшипников скольжения или качения, а также коррозионные оспины, появление рисок и надиров при попадании мелких посторонних частиц во вкладыши подшипников вместе со смазкой приводят к износу шеек валов [3]. Известен ряд способов восстановления изношенных вкладышей подшипников, включающий закрепление на вкладышах дополнительного компенсационного слоя материала и механическую обработку антифрикционного слоя на заданные размеры [4–6]. Развитие научно-технического прогресса в машиностроении в части создания и применения новых материалов приводит к созданию материалов, обладающих повышенной несущей способностью, снижению коэффициента трения, повышению эксплуатационных характеристик, снижению стоимости. Вследствие этого все исследования, направленные на разрешение теоретических и практических вопросов, возникающих при восстановлении вкладышей подшипников скольжения, остаются актуальными.

Один из перспективных способов повышения эксплуатационных характеристик подшипников скольжения – применение многоэлементных материалов, содержащих определенный набор легирующих элементов, способных взять на себя определенные функции. При этом желательно снизить стоимость всей композиции без потери антифрикционных и эксплуатационных свойств.

Цель данной работы заключается в совершенствовании разработанных технологий создания трибосоприжения, близкого по свойствам к оловянистым и оловянно-свинцовистым бронзам.

**Анализ литературных источников.** В автомобилестроении наметилась тенденция к применению в двигателях внутреннего сгорания (не только дизельных) повышенного давления с целью получения более высоких эксплуатационных характеристик [7]. В настоящее время применяются насосы высокого давления и насос-моторы. Основным узлом этих устройств служит роторная группа с подшипниками скольжения из оловянистой, оловянно-свинцовой бронзы. Для изготовления таких подшипников используется литая бронза, имеющая в той или иной степени металлургические дефекты. Наряду с этим бронзы характеризуются низкими прочностными показателями, что, в свою очередь, ограничивает их применение в насосах высокого давления и в целом замедляет развитие нового поколения насосов.

Для восстановления вкладышей подшипников скольжения разработан ряд способов, например: способ нанесения дополнительного материала на изношенную поверхность с последующей пластической деформацией детали и калибровкой рабочей поверхности [6]; удаление с рабочей поверхности изношенных слоев антифрикционного сплава и никеля и последующее нанесение удаленных слоев (тем или иным способом) до восстановления их первоначальных размеров [6]. Эти способы имеют ряд ограничений к использованию и требуют дальнейшего развития и корректировки.

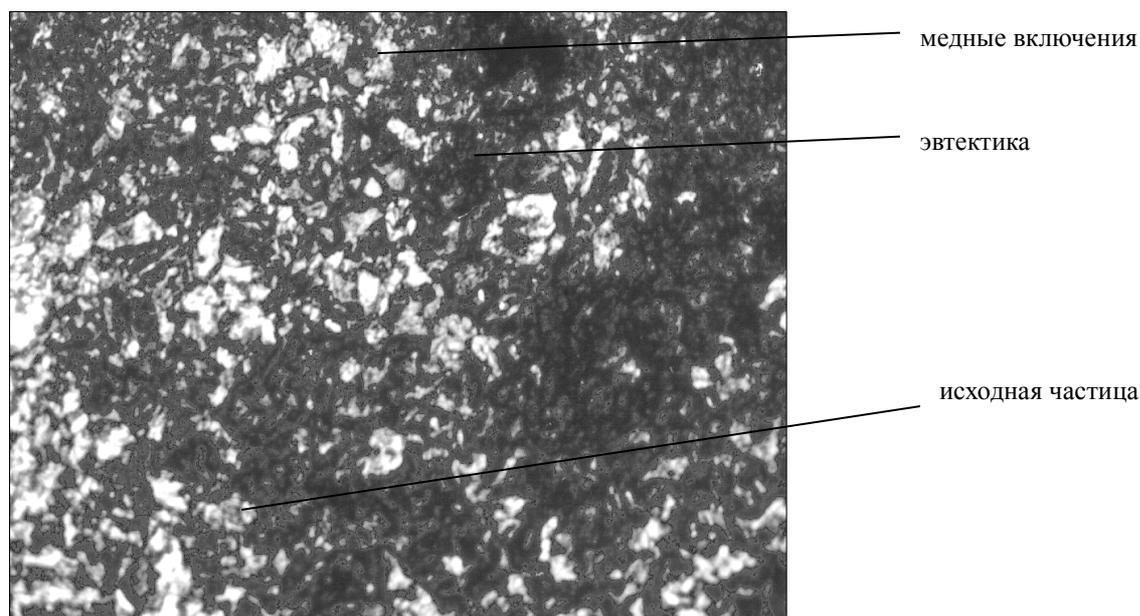
В представляемой работе будет рассмотрен *вопрос развития метода восстановления вкладышей вала насос-мотора с помощью наплавки и напыления*; также будут рассмотрены *различные варианты покрытий и проведены сравнения методов получения покрытий и их свойства*.

**Условия и методы исследования.** Для проведения исследований создана лабораторная установка, которая включает в себя следующие блоки: в качестве сигналообразующего модуля установлен персональный компьютер с программой модуляции сигналов различной частоты; на выходе – рабочий орган, состоящий из электромагнита с абаритными размерами, на котором сердечником служит заостренный прут из стали 40, входящий в контакт с подложкой. На подложке закрепляется опытный образец в момент

наплавки. Причем конец прутка, соприкасающийся с образцом, подкален до 40 HRC. Противоположный конец термической обработке не подвергали. Зона цветов побежалости до ходового участка не доходила, следовательно, он находился в состоянии поставки. Посредством программного обеспечения подбирали несущий сигнал, который через цепь управления передавался на рабочий орган, оказывающий механические воздействия непосредственно на опытный образец. Применялись волны диапазона 30 ГГц, 300 ГГц,  $3 \cdot 10^3$  ГГц, которым соответствуют длины волн 1...0,1; 0,1...0,01; 0,01...0,001 м соответственно.

Уровень ванны замеряли после остывания от верхней границы до подложки. Измерения проводились при помощи микрометра. Головка микрометрическая МГ-25 ТМ. Объем сварочной ванны считали по усредненному показателю в зависимости от погонной энергии 0,6...9,7 см<sup>3</sup>.

**Результаты исследования и их обсуждение.** Варианты многоэлементных покрытий рассмотрены в работах [8–10], проанализированы области их применения. Исходя из результатов анализа условий эксплуатации и режимов работы в качестве наиболее приемлемого предложено принять материал, содержащий: Cu (18%); В (1,8%); основу при этом составляли отходы обработки серого чугуна (СЧ 20) – стружка 2-й группы фракцией 63...120 мкм.



**Рисунок 1. – Структура композиционного материала из диффузионно-легированной стружки Сч+В+Cu при силе тока 280 А (×100)**

Варианты нанесения материалов более подробно рассматривались в работах [11; 12]. При нанесении материала методом напыления стояла задача добиться эксплуатационных характеристик на уровне антифрикционных бронз (таблица 1).

Таблица 1. – Микродюретрический анализ материала из стружки СЧ 20

Диффузионно введенные легирующие элементы	Сила тока, А	Микродюретрические характеристики фаз		Твердость напыленного материала, НВ
		микротвердость Н <sub>20</sub> , МПа	количество, %	
Исходная стружка+В+Cu	200	До 500	3,5	110 ± 16
		500...1000	53	
		1000...1500	18	
		1500...2000	15	
		2000...2500	10,5	
Исходная стружка+В+Cu	240	До 500	21,9	240 ± 12
		500...1000	26	
		1000...1500	31,5	
		1500...2000	20,5	
Исходная стружка+В+Cu	160	> 3000	4,1	115 ± 16
		До 500	18,8	
		500...1000	21,9	
		1000...1500	40,7	
		1500...2000	18,8	

Путем варьирования технологических параметров нанесения добивались пористости (таблица 2) в пределах 11...24%.

Таблица 2. – Пористость материала при различной силе тока

Материал	Сила тока, А	Пористость, %		
		минимальная	максимальная	средняя
Исходная стружка СЧ20	200	18	31	24
ДЛ-стружка СЧ20+В+Cu	200	11	22	17
ДЛ-стружка СЧ20+В+Cu	150	18	32	24
ДЛ-стружка СЧ20+В+Cu	300	6	15	11

Наличие пористости, с одной стороны, способствует образованию смазочных карманов, что в целом благотворно влияет на фрикционную картину в сопряжении [13]. Однако, с другой стороны, вызывает уменьшение элементарных площадок контакта, увеличивая тем самым контактные и контурные напряжения в пятне контакта, что может привести к образованию сварочных мостиков и возникновению локальных вырываний, негативно сказываясь на продолжительности работы сопряжения и его стойкости.

Благодаря анализу способов наплавки выявлено существенное уменьшение пористости на всех технологических режимах нанесения. Общая пористость наблюдалась на уровне 8% (таблица 3). Однако снижение пористости нельзя однозначно отнести на счет положительных моментов структурообразования. При уменьшении количества карманов для смазки снижается количество смазочного материала в районе контакта, а следовательно, ужесточаются режимы эксплуатации и наблюдается рост температурных параметров в зоне контакта [14]. Для нивелирования этого явления предложена технология, сочетающая оригинальные решения в области порошковой металлургии, пластического деформирования исходных порошковых материалов, а на этапе нанесения – с одновременным импульсным механическим либо магнитно-звуковым упрочнением.

При наплавочных операциях отмечено существенное влияние внешнего воздействия только в период кристаллизации покрытия. Однако как при наличии жидкой фазы, так и при наличии твердой фазы покрытия существенного влияния на структуру и свойства получаемого покрытия не было отмечено.

Таблица 3. – Пористость материала из стружки при наплавке с различной силой тока

Материал	Сила тока, А	Пористость, %		
		минимальная	максимальная	средняя
Исходная стружка Сч 20	200	2	15	8
ДЛ-стружка Сч 20+В+Cu	200	1	13	7
ДЛ-стружка Сч 20+В+Cu	150	3	15	9
ДЛ-стружка Сч 20+В+Cu	300	1	16	8

В момент кристаллизации покрытия при наличии внешнего воздействия замечена связь между объемом сварочной ванны и частотой внешнего воздействия. Одновременно наблюдалось некоторое влияние амплитуды внешнего воздействия на свойства нанесенного покрытия. Однако механизм воздействия и взаимосвязь со структурой и свойствами покрытия требуют дальнейшего более тщательного изучения.

При изменении частотных характеристик внешнего воздействия отмечено следующее: при укладке целого количества волн в объем сварочной ванны происходило снижение уровня сварочной ванны по сравнению с необработанным участком (таблица 4).

Таблица 4. – Изменение уровня сварочной ванны в зависимости от частоты воздействия

Частота расчетная, ГГц	Частота практическая, ГГц	Изменение уровня сварочной ванны, мкм	
		напыление	плазменная наплавка
30	34...42	0,1	0,3
300	300...350	0,2	0,5
1000	1020...1940	0,6	1,0

По нашему мнению, сказанное выше может свидетельствовать об уплотнении сварочной ванны в момент кристаллизации. Те же воздействия на жидкую фазу и на полностью охлажденный образец не давали заметного результата, что можно объяснить невозможностью уплотнения жидкой фазы до появления центров кристаллизации. При окончании процесса кристаллизации также не было отмечено заметных различий в состоянии образца. Объяснением тому служит недостаточная погонная энергия воздействия на образец.

При изменении мощности наплавки (меняли силу тока) увеличивался объем сварочной ванны. При новых технологических режимах и прежнем характере внешнего воздействия заметных изменений уровня сварочной ванны не обнаружено. Затем путем расчета подбирали приблизительную частоту внешнего воздействия, а посредством программного изменения несущей частоты добивались возникновения эффектов изменения уровня ванны.

Несоответствие расчетных и практических значений воздействия объясняют погрешности расчета объема сварочной ванны вследствие наличия различного рода включений и примесей, что существенно влияет на температуру как плавления, так и кристаллизации.

При увеличении объема сварочной ванны за счет увеличения погонной энергии наблюдали некоторое изменение уровня ванны. С одной стороны, это характеризуется недостаточностью механического воздействия, а с другой – наличием механического воздействия на подложку. Отсутствие внешнего эффекта объясняет несовпадение объема ванны и количества волн, уложенных в этот объем. С другой стороны, при малых значениях силы тока сварочная ванна имеет недостаточный объем, способный среагировать на внешнее воздействие и, как следствие, отражение волн внешнего механического воздействия от её бортиков, что при наличии волнового характера распространения волн приводит к явлениям интерференции и полного гашения волн в объеме сварочной ванны.

Таблица 5. – Изменение уровня сварочной ванны в зависимости от силы тока

Частота, ГГц	Сила тока, А	Изменение уровня сварочной ванны, мкм	
		напыление	плазменная наплавка
34...42	160		0,1
34...42	200	0,1	0,1
34...42	240		0,1
300...350	160	0,1	0,3
300...350	200	0,1	0,3
300...350	240	0,2	0,5
1020...1940	160	0,3	0,6
1020...1940	200	0,5	0,6
1020...1940	240	0,6	1

При увеличении силы тока увеличивается объем сварочной ванны за счет больших энергозатрат. При этом, по нашему мнению, меньшее влияние оказывают явления интерференции и дифракции. Однако при больших объемах расплавленного металла, вероятно, в большей степени могут развиваться резонансные явления, которые, в свою очередь, проходя через весь объем расплавленного материала, вызывают резонансные явления, начиная с поверхностных слоев металла. Дальнейшему распространению резонансных явлений в глубину материала препятствуют начинающиеся зарождаться центры кристаллизации, которые вызывают дифракционные явления, что препятствует возникновению резонанса.

В случае недостаточности объема сварочной ванны резонансные явления занимают не весь объем ванны, а сосредотачиваются в самом широком месте. Таким образом, явления «спрессовывания» поверхностных слоев происходят только частично, что и сказывается на внешних характеристиках при проведении замеров.

**Заключение.** В результате исследований, направленных на развитие метода восстановления вкладышей подшипников скольжения наплавкой и напылением, выявлено следующее:

- при содержании легирующих элементов В = 1,8%, и Сu = 18% стойкость исследуемого материала находилась на уровне антифрикционных бронз типа БрАЖ 9-4;
- при выборе в качестве метода нанесения покрытия напыление получаем материал с достаточной пористостью, однако способный работать при невысоких показателях скоростей и давлений;
- при наплавке пористость в меньшей степени зависит от технологических параметров нанесения и находится на уровне 7...8%;
- при использовании в качестве метода нанесения покрытия наплавку имеется возможность воздействовать на материал при помощи внешних механических воздействий.

В итоге выполненной научной работы сделано предположение о взаимосвязи частотных характеристик воздействия и объема жидкой фазы сварочной ванны.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Slide Bearing for Heavy Loads / I.V. Bartsev [et al.] // Compressors and Pneumatics. – 2001. – № 6. – P. 12–13.
2. Designing Thrust Sliding Bearings of High Bearing Capacity / V. Martsinkovsky [et al.] // Procedia Engineering. – 2012. – Vol. 39. – P. 148–156.
3. Копелиович, Д. Подшипники скольжения (вкладыши) для двигателей внутреннего сгорания [Электронный ресурс] / Д. Копелиович // Специализированный моторный центр. – Режим доступа: [http://ab-engine.gectopascal.com/king\\_bearings\\_article/](http://ab-engine.gectopascal.com/king_bearings_article/).
4. Дагис, З.С. Способ восстановления изношенных вкладышей подшипников Дагиса [Электронный ресурс] / З.С. Дагис. – Find Patent.ru. – Режим доступа: <http://www.findpatent.ru/patent/208/2082579.html>.
5. Восстановление подшипников скольжения [Электронный ресурс]. – Ремонтно-механическое предприятие. – Режим доступа: <http://www.electrorem.ru/babbit.html>.
6. Способ восстановления втулок-вкладышей подшипников скольжения [Электронный ресурс] / Б.А. Сивак [и др.]. – Режим доступа: <http://www.findpatent.ru/patent/202/2025246.html>.
7. Перспективы развития двигателей внутреннего сгорания [Электронный ресурс] / Avtonov. – Режим доступа: <http://avtonov.info/perspektivy-dvs>.
8. Попов, С.Н. Концептуальные аспекты многокритериального подхода при разработке износостойких сплавов [Электронный ресурс] / С.Н. Попов ; Запорожский нац. техн. ун-т. – Режим доступа: [www.otzv.h1.ru](http://www.otzv.h1.ru).
9. Козловский, И.Л. Разработка порошковых борсодержащих антифрикционных материалов на основе железа для тяжело нагруженных узлов трения : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.16.06 / И.Л. Козловский ; Белорусское республиканское НПО порошковой металлургии. – Минск, 1988. – 18 с.
10. Восстановление деталей машин : справочник / Ф.И. Пантелеенко [и др.] ; под ред. В.П. Иванова. – М. : Машиностроение, 2003. – 672 с.
11. Кутьков, А.А. Износостойкие и антифрикционные покрытия / А.А. Кутьков. – М. : Машиностроение, 1976. – 152 с.
12. Воловик, Е.Л. Справочник по восстановлению деталей / Е.Л. Воловик. – М. : Колос, 1981. – 352 с.
13. Спиридонова, И.М. Структура и свойства железоборуглеродистых сплавов / И.М. Спиридонова // Металловедение и термическая обработка металлов. – 1984. – № 2. – С. 12–16.
14. Пантелеенко, Ф.И. Теоретические и технологические основы получения самофлюсующихся порошков на железной основе диффузионным легированием и разработка износостойких композиционных покрытий из них : дис. ... д-ра техн. наук / Ф.И. Пантелеенко. – Минск, 1992. – 245 с.

Поступила 17.01.2019

#### ALTERNATIVE MATERIALS REPAIR ROTARY GROUP, THE PUMP-MOTORS

V. FRUTSKY, S. PILIPENKO

*The paper analyzes the main methods of restoring the parameters of the working surfaces of the insert bearings of the rotor group of high-pressure pumps and pump motors, suggests its own method for carrying out the process of restoring the pump-motor shaft liners. According to the proposed method, the restoration is carried out by methods of welding and spraying. Conducted research on the application of various coating options. A comparative analysis of methods for producing coatings and their properties has been made. The properties of the resulting coatings were compared with the known properties of antifriction bronze coatings.*

**Keywords:** wear resistance, restoration, liners, bearings, pump-motors, rotor group.

УДК 534.121

## О ВЛИЯНИИ РАЗНОМОДУЛЬНОСТИ МАТЕРИАЛА НА СОБСТВЕННЫЕ ЧАСТОТЫ БАЛОК

*канд. техн. наук, доц. Л.С. ТУРИЩЕВ*  
(Полоцкий государственный университет)

*Рассматриваются свободные колебания упругой балки постоянного симметричного поперечного сечения с учетом разномодульности материала. Получено дифференциальное уравнение колебаний балки с учетом разномодульности её материала. Анализируется влияние различия модуля упругости при растяжении и сжатии материала балки на её собственных частотах. Установлены значения коэффициента разномодульности, при которых её влиянием можно пренебречь, но нельзя игнорировать при определении собственных частот балок.*

**Ключевые слова:** разномодульность, коэффициент разномодульности, балка, свободные колебания, собственные частоты.

Одним из наиболее распространенных видов инженерных конструкций являются балки. Важную роль при их динамических расчетах играет спектр собственных частот свободных колебаний. Обычно при рассмотрении свободных колебаний балок их конструкционный материал считается однородным изотропным упругим телом, поведение которого описывается модулем упругости  $E$  одинаковым при растяжении и сжатии. Однако, как показывают экспериментальные исследования, модули упругости при растяжении  $E^+$  и сжатии  $E^-$  для ряда конструкционных материалов существенно различаются. Степень разномодульности конструкционного материала характеризуется коэффициентом разномодульности [1]

$$\mu = \frac{E^-}{E^+}.$$

Явление разномодульности в той или иной степени присуще практически всем традиционным конструкционным материалам.

Так, согласно [2], это явление установлено для многочисленных сталей и сплавов. Для них коэффициент разномодульности меньше единицы и изменяется в пределах от 0,75 до 0,97.

Существенно разномодульным материалом являются бетоны [3; 7]. Так, коэффициент разномодульности тяжелых бетонов больше единицы и изменяется в пределах от 1,07 до 1,82. В то же время коэффициент разномодульности легких бетонов может быть как больше, так и меньше единицы. Значительной степенью разномодульности обладают современные конструкционные пластмассы [4; 8].

Как показано в [5], учет разномодульности конструкционного материала может оказывать существенное влияние на жесткость стержневых конструкций, поэтому существует необходимость проведения исследований для изучения влияния разномодульности материала на собственные частоты свободных колебаний балок. Рассматриваются свободные поперечные колебания упругой балки постоянного симметричного поперечного сечения. Колебания рассматриваются без учета сил сопротивления.

Для получения дифференциального уравнения свободных колебаний балки с учетом разномодульности материала запишем дифференциальное уравнение движения элементарного участка балки как несвободной материальной точки:

$$m \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = -\frac{\partial Q}{\partial x}. \quad (1)$$

Для нахождения производной  $\frac{\partial Q}{\partial x}$  используем приближенное дифференциальное уравнение оси изогнутой балки с учетом разномодульности материала [1]:

$$D \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = -M, \quad (2)$$

где  $D$  – приведенная изгибная жесткость поперечного сечения балки.

Для симметричного поперечного сечения произвольной формы приведенная изгибная жесткость определяется следующим образом:

$$D = E^- I^- + E^+ I^+.$$

Здесь величины  $I^-$  и  $I^+$  характеризуют моменты инерции соответственно сжатой и растянутой частей поперечного сечения относительно нейтральной оси, положение которой определяется с помощью следующего уравнения:

$$E^- S^- = E^+ S^+,$$

где  $S^-$  – статический момент сжатой части поперечного сечения;  $S^+$  – статический момент растянутой части поперечного сечения.

Продифференцировав (2) дважды по  $x$ , найдем

$$I^- \frac{\partial Q}{\partial x} = -D \frac{\partial^4 y}{\partial x^4}. \quad (3)$$

Подставляя (3) в (1), получим дифференциальное уравнение свободных колебаний балки с учетом разномодульности материала

$$D \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} + m \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = 0. \quad (4)$$

Для решения уравнения (4) используем метод Фурье, согласно которому искомое решение  $y(x, t)$  можно представить в виде произведения двух функций

$$y(x, t) = X(x) \cdot T(t). \quad (5)$$

Входящая в (5) функция  $X(x)$  описывает форму изгибных колебаний балки. Вторая функция  $T(t)$  характеризует закон изменения формы колебаний во времени.

Подставляя (5) в (4), получим дифференциальное уравнение для отыскания функции  $X(x)$

$$\frac{d^4 X}{dx^4} - \zeta k^4 X = 0, \quad (6)$$

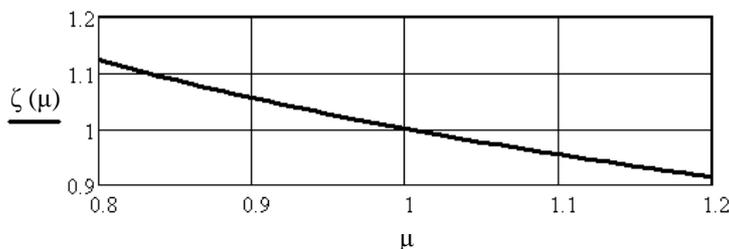
где  $k^4 = \omega^2 \frac{m}{EI_z}$  – частотный коэффициент свободных колебаний балки без учета влияния разномодульности материала;  $\zeta$  – коэффициент влияния разномодульности материала с учетом формы и размеров поперечного сечения балки.

Для поперечного сечения произвольной формы коэффициент  $\zeta$  определяется по формуле [5]

$$\zeta = \frac{EI_z}{D}$$

и в зависимости от величины  $\mu$  может принимать значения как меньше, так и больше единицы.

Функциональные зависимости коэффициентов  $\zeta$  и  $\mu$  для различных типов поперечных сечений получены автором представляемой работы в [5]. Так, например, для прямоугольного поперечного сечения эта зависимость описывается графиком, представленным на рисунке 1.



**Рисунок 1. – Зависимости коэффициентов  $\zeta$  и  $\mu$  для прямоугольного поперечного сечения**

Общее решение уравнения (6) имеет вид

$$X(x) = AS(\zeta kx) + BT(\zeta kx) + CU(\zeta kx) + DV(\zeta kx). \quad (7)$$

В уравнении (7)  $A, B, C, D$  – произвольные постоянные, зависящие от граничных условий задачи;  $S(\zeta kx), T(\zeta kx), U(\zeta kx), V(\zeta kx)$  – обобщенные функции Крылова, учитывающие влияние разномодульности материала:

$$S(\zeta kx) = \frac{1}{2} (ch\zeta kx + \cos \zeta kx),$$

$$T(\zeta kx) = \frac{1}{2} (sh\zeta kx + \sin \zeta kx),$$

$$U(\zeta kx) = \frac{1}{2} (ch\zeta kx - \cos \zeta kx),$$

$$V(\zeta kx) = \frac{1}{2} (sh\zeta kx - \sin \zeta kx).$$

Подчиняя (7) граничным условиям балки, можно получить частотное уравнение для определения собственных частот свободных колебаний с учетом разномодульности материала.

Оценим влияние разномодульности материала на спектр собственных частот свободных колебаний для балки прямоугольного поперечного сечения с шарнирным опиранием концов.

Частотное уравнение для такой балки имеет вид

$$\sin(\zeta kl) = 0.$$

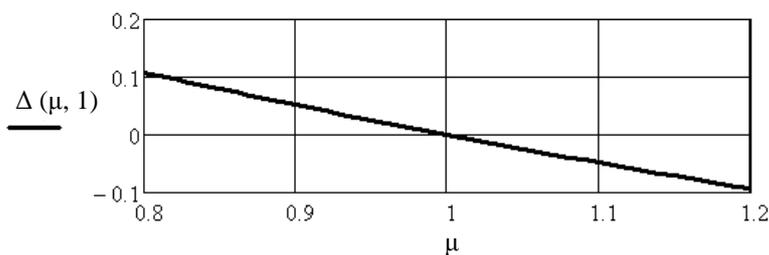
Корни уравнения описываются аналитическим выражением

$$\sin(kl)_n = \frac{n\pi}{\zeta}, \quad (n = 1, 2, 3, \dots) \quad (8)$$

и образуют спектр собственных частот рассматриваемой балки с учетом влияния разномодульности материала.

Из соотношения (8) следует, что при значениях коэффициента разномодульности материала  $\mu < 1$  частотные коэффициенты будут увеличиваться, а при значениях  $\mu > 1$  – уменьшаться.

Относительная погрешность определения частотного коэффициента не зависит от его номера и для рассматриваемой балки описывается графиком (рисунок 2).



**Рисунок 2. – Зависимость величины относительной погрешности определения частотного коэффициента от степени разномодульности материала балки**

Таким образом, из полученного графика следует:

- если различие модулей упругости при растяжении и сжатии не превышает 10%, изменение величин частотных коэффициентов не превышает 5% и, следовательно, в этих случаях влиянием разномодульности материала можно пренебрегать при определении собственных частот свободных колебаний балок;

- в остальных случаях неучет разномодульности конструкционного материала может приводить к ошибкам, величина которых может достигать 10%.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Амбарцумян, С.А. Разномодульная теория упругости / С.А. Амбарцумян. – М. : Физматгиз, 1982. – 317 с.
2. Иванов, Г.П. Исследование несовершенной упругости металлов : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Г.П. Иванов. – Минск, 1973. – 18 с.
3. Авхимков, А.П. Об уравнениях обобщенного закона упругости материалов, разнсопротивляющихся растяжению и сжатию и некоторых их приложениях : автореф. дис. ... канд. техн. наук / А.П. Авхимков. – М., 1975. – 23 с.
4. Одинокова, О.А. Расчет на прочность элементов конструкций с учетом разномодульности и ползучести материалов / О.А. Одинокова. – Хабаровск : Изд-во ТОГУ, 2015. – 101 с.
5. Турищев, Л.С. К вопросу о расчете стержневых конструкций с учетом влияния разномодульности материала / Л.С. Турищев // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В, Промышленность. Прикладные науки. – 2010. – № 2. – С. 63–67.

Поступила 04.02.2019

#### ON THE IMPACT MULTIMODULE OF THE MATERIAL ON EIGENFREQUENCIES OF BEAMS

*L. TOURISCHEV*

*The free oscillations of an elastic beam of a constant symmetric cross-section are considered taking into account the multimodule of the material. The differential equation of beam oscillations is obtained taking into account the multi-modularity of its material. Analyzes the impact of differences of modulus of elasticity in tension and compression of the material of the beam at its own frequency. It is established at what values of the coefficient of multimodule its influence can and can not be neglected in determining the eigenfrequencies of the beams.*

**Keywords:** *roznorodnosi, the coefficient of roznorodnosi, beam, free vibrations, natural frequencies.*

## ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

УДК 665.761.6

### ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ АКТИВИРОВАННОЙ ГЛИНЫ ДЛЯ ДООЧИСТКИ ОСТАТОЧНОГО ПРОДУКТА ПРОЦЕССА «ЮНИКРЕКИНГ»

*канд. техн. наук, доц. А.А. ЕРМАК; П.Ф. ГРИШИН; Н.А. АРТЕМЕНКО*  
(Полоцкий государственный университет)

*Рассмотрены требования к качеству белых масел в зависимости от области их применения. Показано, что для получения белых масел сегодня используются достаточно сложные и дорогостоящие многостадийные технологические процессы сернокислотной либо гидрокаталитической очистки нефтяных фракций. На основании результатов изучения физико-химических свойств и спектральных характеристик остаточного продукта процесса топливного гидрокрекинга вакуумных газойлей по технологии «Юникрекинг» фирмы UOP сделан вывод о его потенциальной пригодности для использования в качестве сырья для получения белых масел. Показана возможность получения белых масел из указанного сырья путём его предварительной сольвентной депарафинизации с последующей адсорбционной доочисткой активированной глиной. Изучены основные закономерности и особенности адсорбционной доочистки масел с использованием активированной глины. Предложен способ регенерации отработанной активированной глины. Намечены перспективы применения активированных глин для адсорбционной доочистки минеральных масел.*

**Ключевые слова:** гидрокрекинг, белые масла, активированная глина, адсорбционная доочистка минеральных масел, регенерация активированной глины.

**Введение.** Остаточный продукт процесса гидрокрекинга вакуумных газойлей по технологии «Юникрекинг» фирмы UOP представляет собой сложную смесь высококипящих соединений, состоящую преимущественно из парафиновых и нафтеновых углеводородов, с низким содержанием серы и фактически полным отсутствием тяжелых металлов. В связи с этим он может быть использован не только при получении топлив, но и как сырьё для нефтехимической промышленности, производства высококачественных базовых масел, а также в качестве компонента пластичных смазок [1–4].

Получение белых масел – одно из перспективных направлений комплексной переработки остаточного продукта процесса гидрокрекинга [3; 5]. Белые масла представляют собой глубоко очищенные парафино-нафтеновые углеводороды с низким содержанием или полным отсутствием ароматических, серо- и азотсодержащих соединений. По степени очистки белые масла подразделяются на две группы: медицинские и технические. Первые находят применение в фармацевтической, косметической и пищевой промышленности. Технические белые масла используются в химической промышленности в качестве растворителей инициаторов и катализаторных комплексов, пластификаторов полимеров, а также в текстильной, полиграфической, бумажной и других отраслях промышленности [5]. Требования к качеству некоторых минеральных белых масел приведены в таблице.

Таблица. – Показатели качества некоторых минеральных белых масел

Наименование показателей	Масло вазелиновое ГОСТ 3164	Масло парфюмерное ГОСТ 4225	PurityFGWO (WO 10...90) [6]	AGIPOBI 10...21 [7; 8]	DIVYOL WOP 60...500 [9]
Вязкость кинематическая: - при 20 °С, мм <sup>2</sup> /с - при 40 °С, мм <sup>2</sup> /с - при 50 °С, мм <sup>2</sup> /с - при 100 °С, мм <sup>2</sup> /с	– – 28,0...38,5 –	– – 16,5...23,0 –	– 12,7...102,8 – 3,1 – 11,8	185,0/31,5 60,0...14,0 – –	– 7,0...85,0 – –
Температура вспышки в закрытом тигле, °С, не ниже	185	180	175...266	225...190	145...220
Плотность при 20 °С, кг/м <sup>3</sup>	870,0...890,0	менее 880,0	–	–	–
Плотность при 15 °С, кг/м <sup>3</sup>	–	–	849,0...870,0	885,0...845,0	810,0...860,0
Индекс вязкости	–	–	98...105	–	–
Зольность, % масс., не более	0,005	0,004	–	–	–
Температура застывания, °С, не выше	минус 8	минус 8	минус 15... ...минус 24	минус 15... ...минус 7	минус 12... ...минус 15
Цвет по ASTM D 156	–	–	30	30	30
Цвет, условные единицы КНС-1, не более	6,0	6,0	–	–	–

В связи с тем, что при использовании белых масел возможен их контакт с кожей и продуктами питания, необходимо оценивать их безопасность для человека и животных. Известно, что канцерогенное и раздражающее действие на живые организмы оказывают ароматические углеводороды, прежде всего полициклические, которые могут входить в состав сырья для получения белых масел [10].

Для оценки безопасности белые масла подвергаются специальным испытаниям, успешное прохождение которых позволяет применять их для медицинских целей. Перечень этих испытаний приведен в сборниках «Государственная фармакопея» [11; 12], устанавливающих нормы качества и критерии подлинности (идентификации) лекарственного сырья – медицинских субстанций, вспомогательных веществ, диагностических и лекарственных средств и изготовленных из них препаратов. Критериями подлинности вазелинового масла являются: соответствие исследуемого образца инфракрасному спектру пропускания стандартного образца; отсутствие омыляемых гидроксидом натрия веществ; вязкость. Присутствие полициклических ароматических углеводородов оценивается при помощи метода УФ-спектрофотометрии путём сравнения оптической плотности испытуемого и контрольного раствора. Также контролируется кислотность или щёлочность, относительная плотность, остаточное содержание органических растворителей, твёрдых парафинов, легкообугливающих веществ, микробиологическая чистота [11].

Долгие годы традиционным и единственным методом получения белых масел служила сернокислотная очистка дистиллятов малопарафинистых нефтей с высоким содержанием нафтеновых углеводородов [13; 14]. Данная технология включает в себя такие стадии, как: взаимодействие сырья с сульфированным агентом; выделение сульфокислот; нейтрализация очищенного масла щелочью; промывка спиртом и доочистка адсорбентами. Метод сернокислотной очистки применяется и в настоящее время при получении медицинского вазелинового масла по ГОСТ 3164.

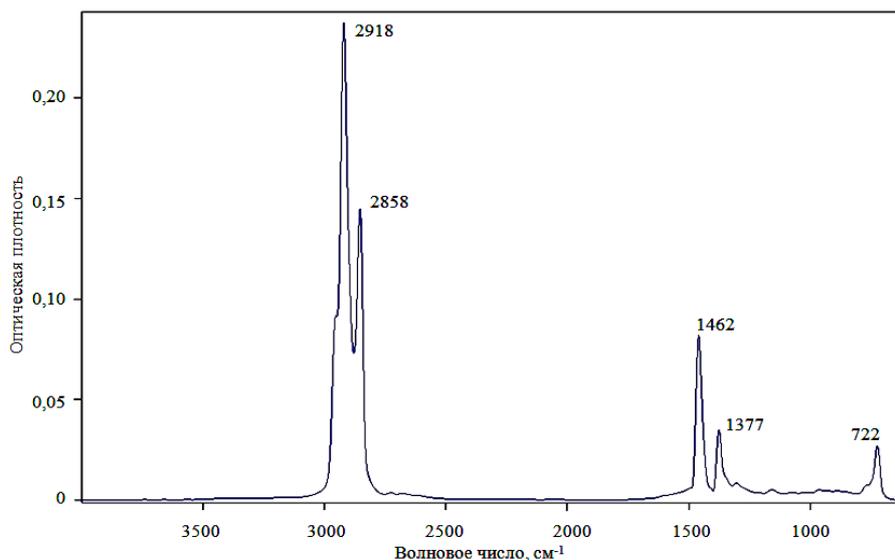
В последнее время для производства белых масел всё шире используют гидрокаталитические процессы, как правило, включающие стадии гидроочистки, глубокого гидрокрекинга при давлении до 20 МПа, каталитической изодепарафинизации с последующей гидродоочисткой (гидрофинишином) получаемого продукта [15]. Существуют технологии получения белых масел и из продуктов процесса топливного гидрокрекинга вакуумных газойлей. Их суть заключается во фракционировании остаточного продукта процесса гидрокрекинга с последующей глубокой гидродоочисткой и депарафинизацией полученных фракций [5]. Использование гидрогенизационных процессов для производства белых масел из продуктов топливного гидрокрекинга сопряжено с большими капитальными затратами, так как потребует строительства дополнительных технологических установок с соответствующей вспомогательной инфраструктурой и применения дорогостоящих катализаторов. С учётом небольшого сегмента рынка организация производства белых масел для крупных нефтеперерабатывающих предприятий, в основном, экономически нецелесообразна.

В связи с вышесказанным разработка относительно простых и доступных технологий получения белых масел из остаточного продукта процесса гидрокрекинга – актуальная задача.

Одним из известных способов доочистки минеральных масел является адсорбционная очистка. В качестве адсорбента на установках контактной доочистки масел применяются отбеливающие глины, представляющие собой горные породы с выраженными сорбционными свойствами. Как показали предварительные исследования, используемые в процессе контактной доочистки базовых масел бентонитовые глины не пригодны для эффективной доочистки остаточного продукта процесса гидрокрекинга, тем более получения на их основе белых масел. Однако в результате специальной физико-химической обработки исходной отбеливающей глины её сорбционные свойства удалось значительно улучшить и благодаря этому получить с её применением продукт, представляющий собой бесцветную прозрачную маслянистую жидкость, не флуоресцирующую при дневном свете. Изучение свойств полученного продукта, закономерностей изменения его свойств в ходе адсорбционной очистки, а также выявление потенциальной возможности регенерации синтезированной активированной глины – цель настоящей работы.

**Исследовательская часть.** В результате фракционирования под вакуумом остаточного продукта процесса гидрокрекинга может быть получен ряд фракций, отличающихся по физико-химическим свойствам [1]. С повышением температуры кипения фракции увеличивается её плотность, кинематическая вязкость, температура вспышки и температура застывания. При этом наблюдается рост содержания полициклических ароматических углеводородов, смолистых веществ и, соответственно, изменение цвета от жёлтого до светло-коричневого. В связи с этим для получения из вышеуказанных фракций белых масел их необходимо подвергать депарафинизации и очистке.

В качестве объекта исследований в настоящей работе использована фракция 375...460 °С с температурой застывания плюс 30 °С и индексом вязкости 130 пунктов. В результате сольвентной депарафинизации получено депарафинизованное масло светло-жёлтого цвета с температурой застывания минус 18 °С и индексом вязкости 120 пунктов. Плотность депарафинизованного масла при температуре 20 °С составляла 839,3 кг/м<sup>3</sup>; содержание в масле парафино-нафтеновых углеводородов – 98,34% масс.; смолистых веществ – 0,25% масс., ароматических углеводородов – 1,41% масс., в том числе полициклических 0,5% масс. ИК-спектр образца депарафинизованного масла, полученного из остаточного продукта процесса топливного гидрокрекинга по технологии «Юникрекинг», представлен на рисунке 1.



**Рисунок 1. – ИК-спектр образца депарафинизированного масла, полученного из остаточного продукта процесса «Юникрекинг»**

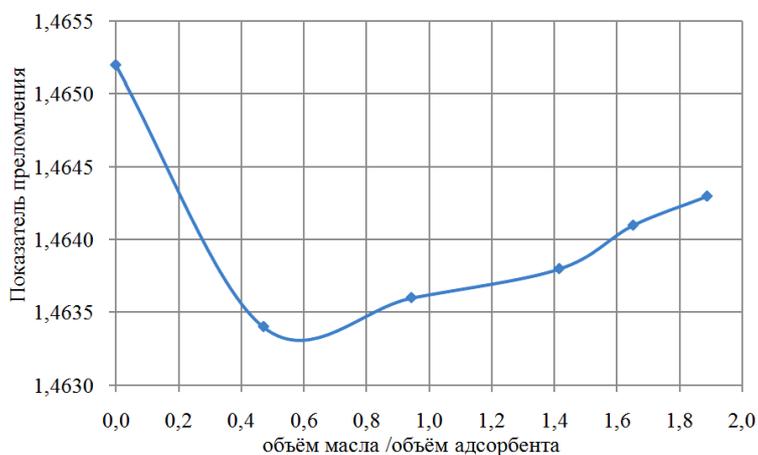
Исследования проводились при помощи ИК-Фурье спектрометра Bruker ALPHA.

Расположение полос поглощения ИК-спектра исследуемого депарафинизированного масла совпадает с полосами поглощения в спектре вазелинового масла [12; 16], что потенциально позволяет его использовать для получения белых масел. Наиболее интенсивные полосы поглощения соответствуют [17]:

- валентным колебаниям (C–H) в группах (–CH<sub>2</sub>–) ( $2920 \pm 5$ ) см<sup>-1</sup> и (–CH<sub>3</sub>) ( $2860 \pm 5$ ) см<sup>-1</sup>;
- ножничным колебаниям метиленовой группы в алканах вблизи 1467 см<sup>-1</sup> и симметричным деформационным колебаниям (–CH<sub>3</sub>) групп ( $1375 \pm 5$ ) см<sup>-1</sup>;
- маятниковым деформационным колебаниям групп (–CH<sub>2</sub>–) ( $720 \pm 5$ ) см<sup>-1</sup>.

В области волновых чисел ( $1030 \pm 5$ ) см<sup>-1</sup>, предположительно относящихся к биядерным ареновым структурам, а также волновых чисел ( $870 \pm 5$ ), ( $810 \pm 5$ ), ( $770 \pm 5$ ), ( $750 \pm 5$ ) и ( $695 \pm 5$ ) см<sup>-1</sup>, относящихся к деформационным колебаниям (–CH–) групп ароматических колец моно- и полиядерных замещенных структур, выраженных полос поглощения не наблюдается. Однако, как отмечалось выше, в небольшом количестве данные соединения присутствуют в исследуемом образце. Поэтому оптическая плотность в указанных диапазонах волновых чисел не равна нулю.

Адсорбционная очистка депарафинизированного масла проводилась при температуре ( $18 \pm 2$ ) °С активированной глиной с полной статической обменной ёмкостью 9,44 мг-экв/г (ГОСТ 20255.1) и насыпной плотностью, равной 739,1 кг/м<sup>3</sup>. Высота слоя адсорбента в колонке составляла 300 мм. Предварительная оценка эффективности очистки масла проводилась по изменению показателя преломления при 20 °С с помощью рефрактометра Rudolph Research Analytical марки J-257. Тенденция изменения показателя преломления фильтрата в зависимости от отношения «объём масла/объём адсорбента» представлена на рисунке 2.



**Рисунок 2. – Изменение показателя преломления фильтрата при 20 °С в зависимости от отношения «объём масла/объём адсорбента»**

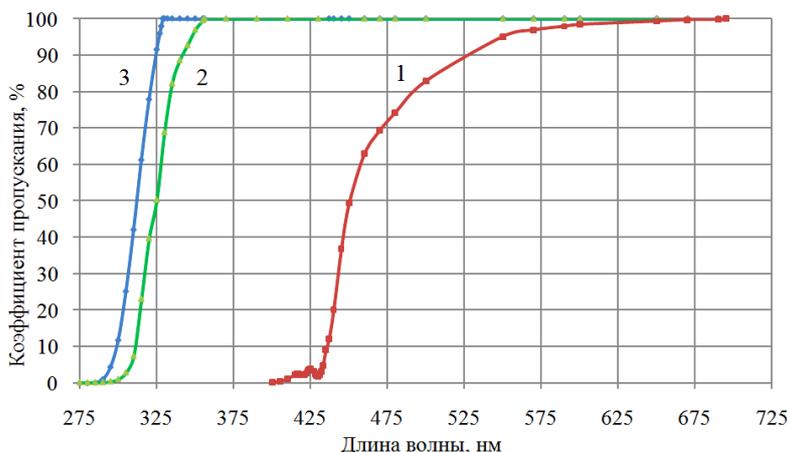
Визуально все полученные фильтраты представляли собой бесцветные прозрачные маслянистые жидкости, не флуоресцирующие при дневном свете. При этом в ходе адсорбционной очистки масла его показатель преломления вначале снижается, а затем, с увеличением объема пропущенного через активированную глину масла, начинает увеличиваться. Это свидетельствует о высокой эффективности используемого адсорбента по удалению из масла веществ, придающих ему окраску, но в то же время указывает на изменчивость химического состава фильтрата.

При изучении изменения группового состава масла по методу ВНИИ НП [18] установлено, что в результате адсорбционной очистки из него полностью удаляются смолистые вещества, би- и полициклические ароматические соединения, т.е. вещества с показателем преломления при 20 °С выше 1,5300. Также наблюдается снижение кислотного числа масла на 80...90% отн.

При соотношении «объем масла/объем адсорбента» менее единицы содержание углеводов с одним ароматическим кольцом в фильтрате снижается примерно на 70...80% масс. При этом содержание парафино-нафтеновых углеводов увеличивается примерно на 1,5% масс. и составляет около 99,7% масс. Однако с ростом соотношения «объем масла/объем адсорбента» содержание в очищаемом масле ароматических углеводов начинает увеличиваться, а парафино-нафтеновых углеводов снижаться, что и приводит к росту показателя преломления получаемого фильтрата.

Сравнительный анализ ИК-спектров образцов исходного депарафинизированного масла и фильтрата, полученного при отношении «объем масла/объем адсорбента», равном 0,94, не выявил заметного отличия в интенсивности наблюдаемых полос поглощения. Снижение оптической плотности у исследуемого фильтрата отмечено только в области волновых чисел (1500...1600) см<sup>-1</sup>.

Для оценки эффективности адсорбционной очистки исследуемого масла более информативны диапазоны длин волн видимого и ультрафиолетового частей спектра. На рисунке 3 представлены результаты изучения изменения коэффициента пропускания депарафинизированного масла до и после адсорбционной очистки в диапазоне длин волн от 275 до 725 нм. Исследования проводились при помощи спектрофотометра ПЭ-5400УФ. В качестве образца сравнения использовалось медицинское вазелиновое масло, соответствующее ГОСТ 3164.



**Рисунок 3. – Изменение коэффициента пропускания депарафинизированного масла до (кривая 1) и после (кривая 2) адсорбционной очистки, а также вазелинового масла (кривая 3) в диапазоне длин волн от 275 до 725 нм**

При отношении «объем масла/объем адсорбента», равном 0,94, коэффициент пропускания фильтрата (см. рисунок 3, кривая 2) приблизился к коэффициенту пропускания медицинского вазелинового масла (см. рисунок 3, кривая 3). При длине волны света более 370 нм коэффициент пропускания фильтрата идентичен коэффициенту пропускания дистиллированной воды. Однако следует отметить, что с увеличением отношения «объем масла/объем адсорбента» степень очистки получаемого фильтрата снижается и при указанном соотношении, равном 3, кривая изменения коэффициента пропускания фильтрата вплотную приближается к кривой коэффициента пропускания депарафинизированного масла (см. рисунок 3, кривая 1).

Все исследованные в настоящей работе образцы в исходном состоянии в ближнем ультрафиолетовом диапазоне спектра непрозрачны. Поэтому для проведения исследований были приготовлены их 2% об. растворы в н-гексане. Кривые изменения коэффициента поглощения депарафинизированного масла до и после адсорбционной очистки, а также вазелинового масла в диапазоне длин волн от 230 до 300 нм представлены на рисунке 4.

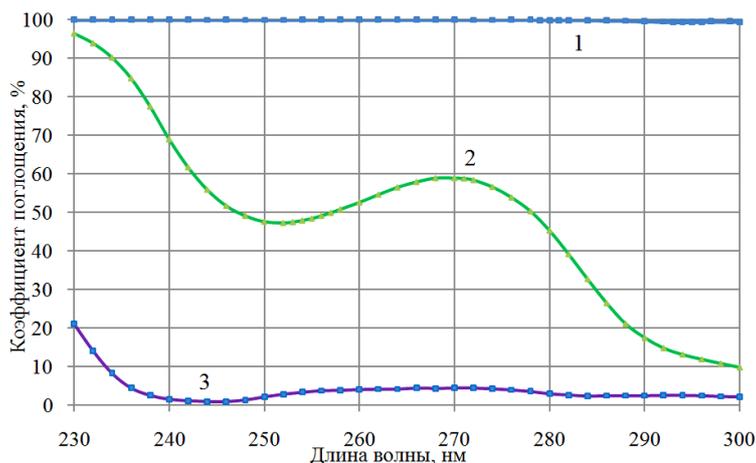


Рисунок 4. – УФ-спектры поглощения растворов образцов депарафинизованного масла до (кривая 1) и после (кривая 2) адсорбционной очистки, а также вазелинового масла (кривая 3) в н-гексане

Установлено, что исходное депарафинизованное масло (рисунок 4, кривая 1) даже в виде 2% об. раствора в н-гексане имеет коэффициенты поглощения в исследуемом диапазоне длин волн в пределах от 99,97 до 99,39%. Вазелиновое масло (см. рисунок 4, кривая 3) обладает наименьшей поглощающей способностью в указанном диапазоне длин волн. УФ-спектр фильтрата, полученного в результате адсорбционной очистки депарафинизованного масла (см. рисунок 4, кривая 4), занимает промежуточное положение. На основании анализа ультрафиолетовых спектров поглощения углеводородов, приведенных в [19], можно предположить, что в полученном фильтрате могут содержаться соединения, в состав которых входят производные бензола, а возможно и нафталина. Однако в связи с особенностями углеводородного состава остаточного продукта процесса гидрокрекинга, состоящего преимущественно из циклоалканов, вплоть до гексациклоалкана, и их алкилпроизводных [20], для расшифровки полученных УФ-спектров требуется проведение специальных исследований. Кроме того, в состав смешанных углеводородов, содержащихся в остаточном продукте процесса гидрокрекинга, могут входить и ароматические кольца, которые невозможно полностью удалить как сернокислотной, так и адсорбционной очисткой в связи с тем, что часть из них находится внутри крупных молекул и экранированы нафтеновыми кольцами и алкильными заместителями. Таким образом, можно сделать вывод, что путём адсорбционной очистки активированной глиной потенциально можно получить белые масла технического назначения. Вопрос использования данного метода для производства белых масел медицинского назначения остаётся открытым и требует проведения дополнительных физико-химических и токсиколого-гигиенических исследований. Вероятно, для получения белых масел медицинского назначения потребуется применение технологии многоступенчатой адсорбционной доочистки получаемых фильтратов.

Ключевой проблемой практического применения метода адсорбционной очистки масел, получаемых из остаточного продукта процесса гидрокрекинга, является ограниченная сорбционная ёмкость активированной глины и необходимость её регенерации. Исходная активированная глина представляет собой порошок белого или светло-серого цвета с размером частиц преимущественно от 0,25 до 1,0 мм. В ходе адсорбционной очистки цвет частиц глины становится угольно черным, и для восстановления сорбционной активности глину необходимо регенерировать.

Как показали исследования, для удаления с поверхности частиц отработанной глины адсорбата наиболее эффективным десорбентом является смесь одноатомного алифатического спирта (этанола) и ароматических углеводородов – бензола или толуола. После обработки спиртобензольной или спиртотолуольной смесями при оптимально подобранном соотношении компонентов цвет глины становится светло-жёлтым, а её сорбционная активность практически полностью восстанавливается. Раствор десорбента приобретает тёмно-коричневый цвет. При использовании в качестве десорбента только ароматических углеводородов сорбционная активность глины, оцениваемая по изменению показателя преломления фильтрата, пропущенного через адсорбент очищаемого масла, также частично восстанавливается, но не более чем на 80% отн. При этом цвет глины остаётся угольно чёрным, а раствор десорбента приобретает светло-коричневый цвет.

Содержание в составе десорбента ароматических углеводородов неизбежно приведет к их попаданию в очищенное масло. В связи с этим предлагается вначале проводить двухступенчатую регенерацию отработанной активированной глины спиртобензольной или спиртотолуольной смесью, а затем промывать регенерированную глину спиртом для вытеснения из неё ароматических углеводородов. В технологической

схеме установки адсорбционной очистки масел активированной глиной следует предусмотреть блок регенерации десорбента. Продуктом данного блока, помимо регенерированного десорбента, будет концентрат спиртобензольных смол и полиароматических углеводородов, который потенциально может быть использован в качестве сырья для получения поверхностно-активных веществ технического назначения.

Таким образом, на основании проведенных исследований можно сделать следующие **выводы**:

- остаточный продукт процесса гидрокрекинга является сырьём, потенциально пригодным для производства белых масел технического и медицинского назначения;
- белые масла могут быть получены путём адсорбционной очистки предварительно депарафинированного остаточного продукта процесса гидрокрекинга или входящих в его состав фракций с использованием специальной активированной глины;
- активированная глина позволяет получать продукт, представляющий собой бесцветную прозрачную маслянистую жидкость, не флуоресцирующую при дневном свете за счёт эффективного поглощения из очищаемого сырья полициклических ароматических углеводородов и смол;
- к недостаткам использования адсорбционного метода очистки масел относится ограниченность сорбционной ёмкости активированной глины, что свидетельствует о необходимости проведения её периодической регенерации;
- наиболее эффективным десорбентом, позволяющим осуществлять регенерацию отработанной активированной глины, является смесь ароматических углеводородов с одноатомными алифатическими спиртами.

Разработка и внедрение в промышленность технологического процесса адсорбционной очистки масел активированными глинами позволит расширить ассортимент получаемой продукции с высокой добавленной стоимостью, в частности белых масел различного назначения, а также улучшить показатели качества минеральных базовых масел. При этом следует принять во внимание, что в результате сотрудничества заинтересованных в данной технологии промышленных предприятий и профильных научно-исследовательских центров производство активированной глины в необходимых объёмах с заданными или оптимизированными под конкретное сырьё сорбционными свойствами возможно непосредственно на предприятии потребителя.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Свойства и перспективные направления переработки остаточного продукта процесса «Юникрекинг» / А.А. Ермак [и др.] // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В, Промышленность. Прикладные науки. – 2015. – № 11. – С. 115–120.
2. Фамутдинов, Р.Н. Определение качества сырья для высокоиндексных масел из остатка гидрокрекинга / Р.Н. Фамутдинов, С.В. Дезорцев // Башкирский химический журнал. – 2013. – Т. 20, № 4. – С. 37–39.
3. Sung, H.Y. VHVI Base Oils and White Oils from Fuels Hydrocracker Bottoms / H.Y. Sung, S.H. Kwon, J.P. Andre // Asia Fuels and Lubricants Conference, Singapore, January 25–28, 2000. – P. 21.
4. Булавка, Ю.А. Смазочная композиция на основе отходов нефтехимии для консервации техники [Электронный ресурс] / Ю.А. Булавка. – Режим доступа: <http://elib.psu.by:8080/handle/123456789/21985>. – Дата доступа: 30.01.2019.
5. Пиголева, И.В. Разработка технологии получения белых масел для эмульсионных вакцин из остаточных продуктов гидрокрекинга : дис. ... канд. техн. наук : 05.17.07 ; Рос. гос. ун-т нефти и газа (национальный исследовательский университет) им. И.М. Губкина, 2018. – 156 с.
6. Purity FG WO. Белые минеральные масла. Паспорт смазочного материала [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://oilengine.ru/wp-content/uploads/2016/08/Petro-Canada-PURITY-FG-WO-WHITE-OIL-35.pdf>. – Дата доступа: 30.01.2019.
7. Agip OVI серия белых масел высокой степени очистки [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://eni-agip.com/wp-content/uploads/pdf/prom/belye/Agip%20OVI.pdf>. – Дата доступа: 30.01.2019.
8. Зарубежные масла, смазки, присадки, технические жидкости : междунар. каталог. Вып. 3. – М. : Издат. центр «Техинформ» МАИ, 2005. – 380 с.
9. Divyol wop speciality mineral oils [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://gandharoil.com/pdf/divyol-wop-oils-technical.pdf>. – Дата доступа: 30.01.2019.
10. Luch, A. The Carcinogenic Effects of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons / A. Luch, Imperial College Press, 2005. – 489 p.
11. Государственная Фармакопея Республики Беларусь. – Минск : М-во здравоохранения Респ. Беларусь, 2007. – Т. II : Общие и частные фармакопейные статьи. – 471 с.
12. Государственная Фармакопея Российской Федерации. – XIII изд. – М. : М-во здравоохранения Рос. Федерации, 2015. – 1294 с.

13. Биск, В. Производство белого масла / В. Биск, А. Клюр ; пер. И.И. Абрамсон ; ред. В.П. Суханов // IV Междунар. нефтяной конгр. Т. IV. Технология переработки нефти и сланцев. – М. : ГОСТОП ТЕХИЗДАТ, 1956. – С. 265–286.
14. Черножуков, Н.И. Технология переработки нефти и газа. Производство товарных нефтепродуктов / Н.И. Черножуков ; под ред. А.А. Гуреева и Б.И. Бондаренко – М. : Химия, 1978. – Ч. 3 : Очистка и разделение нефтяного сырья. – 424 с.
15. Современное состояние производства белых масел: зарубежные и отечественные технологии / А.А. Щепалов [и др.] // Вестник ПНИПУ. Химическая технология и биотехнология. – 2018. – № 4. – С. 138–150.
16. Тарасевич, Б.Н. Некоторые вопросы применения физических методов в органической химии, ИК-спектроскопия / Б.Н. Тарасевич ; МГУ им. М.В. Ломоносова, хим. фак., каф. органической химии [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.chem.msu.ru/rus/teaching/tarasevich/Vvedeniye.v.spetsializatsiju-2018.pdf>. – Дата доступа: 30.01.2019.
17. Смит, А. Прикладная ИК-спектроскопия / А. Смит ; пер. с англ. Б.Н. Тарасевича ; под ред. А.А. Мальцева. – М. : Мир, 1982. – 328 с.
18. Химия нефти. Руководство к лабораторным занятиям : учеб. пособие для вузов / И.Н. Дияров [и др.]. – Л. : Химия, 1990. – 240 с.
19. Казицына, Л.А. Применение УФ-, ИК-, ЯМР- и масс-спектроскопии в органической химии / Л.А. Казицына, Н.Б. Куплетская. – М. : Изд-во Моск. ун-та, 1979. – 240 с.
20. Pyrolysis of high-boiling product fractions from petroleum vacuum distillate hydrocracking / G. Sebor [et al.] // Fuel Processing Technology. – 1994. – V. 40. – P. 49–59.

Поступила 11.02.2019

## PROSPECTS FOR THE USE OF ACTIVATED CLAY FOR PURIFICATION THE RESIDUAL PRODUCT OF THE PROCESS “UNICRACKING”

A. YERMAK, P. GRISHIN, N. ARTEMENOK

*The requirements to the quality of white oils depending on the field of their application are considered. It is shown, that for the production of white oils are currently used quite complex and expensive multistage technological processes of sulfuric acid or hydrocatalytic purification of oil fractions. On the basis of the results of the study of physical and chemical properties and spectral characteristics of the residual product of the process of fuel hydrocracking of vacuum gas oils on the technology of “Unicreking” (UOP) concluded its potential suitability for use as a raw material for white oils. The possibility of obtaining white oils from the above-mentioned raw materials by its preliminary solvent dewaxing with subsequent adsorption post-treatment with activated clay is shown. The basic laws and features of adsorption post-treatment of oils using activated clay are studied. A method of regeneration of spent activated clay is proposed. The prospects of using activated clays for adsorption purification of mineral oils are outlined.*

**Keywords:** hydrocracking, white oils, activated clay, adsorption purification of mineral oils, regeneration of activated clay.

УДК 678:615.28

## АНТИМИКРОБНЫЕ СВОЙСТВА КАТИОННЫХ ПОЛИЭЛЕКТРОЛИТОВ

*д-р хим. наук М.А. ЗИЛЬБЕРГЛЕЙТ**(Институт общей и неорганической химии НАН Беларуси, Минск);  
канд. техн. наук, доц. М.О. ШЕВЧУК; канд. хим. наук С.В. НЕСТЕРОВА  
(Белорусский государственный технологический университет, Минск);  
канд. хим. наук, доц. С.Ф. ЯКУБОВСКИЙ  
(Полоцкий государственный университет)*

*Представлены обобщенные результаты анализа литературных данных по исследованиям полимерных материалов, обладающих антимикробными свойствами. Рассмотрены четыре группы полимерных антимикробных материалов, а также их наиболее значимые представители: полимерные материалы с четвертичным атомом азота, полимеры пиридинового типа, производные имидазола, хитозан, полипептидные антибиотики.*

**Ключевые слова:** *полимерные антимикробные материалы, поливинилпиридин, имидазол, хитозан, полипептидные антибиотики.*

**Введение.** Патогенные микроорганизмы (грамотрицательные и грамположительные бактерии, грибы, микроводоросли, вирусы) способны распространяться путем косвенной передачи, которая включает контакт с зараженными вредоносными микроорганизмами, веществами или поверхностями. В частности, к последним относятся бытовые предметы, текстильные изделия, упаковка пищевых продуктов, медицинские изделия, хирургический и зубоврачебный инструмент, бытовая техника и т.д. В этом смысле полимеры благодаря присущим им ценным свойствам широко и эффективно применяются во всех перечисленных сферах. В связи с этим придание полимерам антимикробных свойств является актуальной задачей, которой ранее не уделялось должного внимания.

По данным MarketsandMarkets™, ожидается, что размер рынка автомобильных пластмасс для легковых автомобилей вырастет до 16,17 млрд долл. США к 2020 году – с 9,86 млрд долл. США в 2014 году при ожидаемом среднем показателе в 8,7% между 2015 и 2020 годами. Азиатско-Тихоокеанский регион является крупнейшим рынком противомикробных пластмасс и, по прогнозам, сохранит эту позицию в течение следующих пяти лет, что обусловлено ростом потребления пластмасс и быстрой урбанизацией, которая стимулирует спрос на противомикробные пластмассы в этом регионе.

Высокие темпы роста отрасли можно объяснить повышением осведомленности потребителей о значении антимикробного пластика. Это, как ожидается, даст толчок глобальному спросу на антимикробный пластик в упаковке и медицинском применении. Очевидно, можно считать, что область антимикробных полимеров неуклонно, но медленно прогрессирует и в течение последних лет, похоже, находится на грани быстрого расширения. Скорее всего, движущей силой этого процесса являются разработки, связанные с имплантатами и биомедицинскими устройствами, а также с текстильными материалами медицинского назначения.

**Основная часть.** Для различных классов антимикробных полимеров существуют различные химические механизмы их антимикробного действия. Прежде всего, речь идет о взаимодействии с функциональными группами микробной клетки, которые играют важную роль в метаболизме и/или образовании клеточных структур (сульфгидрильные, карбоксильные, альдегидные, спиртовые, аминогруппы).

Если рассмотреть только физические процессы контактов микробов с полимером, то для растворимых полимеров возможна ограниченная диффузия в клетку микроорганизмов, что связано со значительными размерами полимера по сравнению с низкомолекулярными аналогами, а также процессы сорбции на поверхности клетки за счет электростатических, хемосорбционных и других видов адсорбционно-взаимодействия в системе «клетка – полимер» [1]. В конечном итоге нарушается жизнедеятельность клетки за счет потери ее барьерных и транспортных функций вплоть до разрушения ее цитоплазматической мембраны, в результате чего клетка погибает.

Рассматривая совокупность полимерных антимикробных материалов, их можно разбить на четыре категории: а) полимеры с антимикробной активностью; б) полимеры, которые подвергаются химическим модификациям для достижения антимикробной активности; в) полимеры, содержащие в виде добавок антимикробные органические соединения; г) полимеры, содержащие в виде добавок антимикробные неорганические соединения. В определенном смысле такая классификация достаточно условна, так как в литературе зачастую встречаются различные комбинации этих веществ, в которых трудно оценить вклад каждой составляющей.

**Полимеры с антимикробной активностью.** Как видно из их названия, эти полимеры отображают антимикробную активность сами по себе. Обычно их химическая структура используется в качестве

ключевой характеристики. К ним принадлежат полимеры с четвертичными атомами азота (акриловые и метакриловые полимеры, катионные сопряженные полиэлектролиты, полисилоксаны, полиоксазолины, полиионены и др.); гуанидинсодержащие полимеры; полимеры, имитирующие природные пептиды (синтетические пептиды, ариламидные и фенилен-этиниленовые каркасные полимеры, галоген полимеры, производные полиинорборнена); галогеновые полимеры (фтор или хлорсодержащие полимеры, полимерные N-галамины); полимеры, содержащие фосфо- и сульфопроизводные, производные фенола и бензойной кислоты, металлоорганические полимеры и другие.

**Полимеры, которые подвергаются химическим модификациям для достижения антимикробного действия.** Существуют разные подходы для включения антимикробной активности в полимеры. В частности, можно различить несколько вариантов, если речь идет о химической модификации: небольшая молекула с антимикробной активностью ковалентно связана с полимером; антимикробные пептиды фиксируются на неактивных полимерах и противомикробные полимеры привиты к обычным полимерам. Во всех этих случаях желательно, чтобы химическая модификация не вызывала ухудшения свойств конечного полимерного материала.

**Полимеры, содержащие антимикробные органические соединения.** В этом случае антимикробная активность обусловлена нековалентными связями между антимикробными агентами, природными или синтетическими, и полимерами с соответствующим высвобождением агентов.

**Полимеры, включающие противомикробные неорганические соединения.** Из неорганических веществ сильным антимикробным действием обладают: соли тяжелых металлов (ртути, меди, серебра); окислители – хлор, озон, йод, пероксид водорода, хлорная известь, перманганат калия); щелочи и кислоты (едкий натр, сернистая, фтористо-водородная, борная кислоты); некоторые газы (сероводород, оксид углерода, сернистый, углекислый газ).

**Полимерные материалы с четвертичным атомом азота.** Принято считать, что такие материалы широко распространены, однако, согласно литературным данным, количество публикаций начиная с 1998 года не превышает 80 наименований. Очевидно, это обусловлено тем, что основная масса исследований проведена в 70-е годы прошлого столетия. Как известно, большинство бактериальных клеточных стенок заряжены отрицательно, так как содержат в качестве основного компонента фосфатидилэтаноламин, а также остатки сиаловых и тейхоевых кислот. Следовательно, большинство антимикробных полимеров для осуществления взаимодействия с клеткой должны быть заряжены положительно. В этом отношении полимеры с четвертичным атомом азота, вероятно, являются наиболее изученным видом полимерных биоцидов.

**Полимеры пиридинового типа** (мономеры – производные винилпиридина) являются яркой демонстрацией сказанного выше. В частности, в работах [2–6] показано, что на поверхности часового стекла после силанизации, аминирования, бромалкилирования и прививки поливинил N-гексилпиридина образуется слой, подавляющий деятельность эпидермального стафилококка, синегнойной и кишечной палочки (рисунок 1).

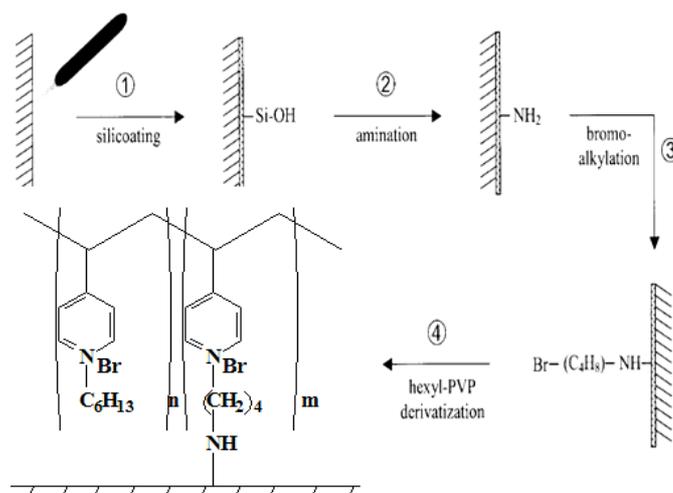


Рисунок 1. – Схема силанизации, аминирования, бромалкилирования и прививки поливинил N-гексилпиридина на стекло

Несмотря на бактерицидную эффективность четвертичных поливинилпиридинов, они демонстрируют минимальную биосовместимость, что ограничивает их использование в биоматериалах. Включение гидрофильных и биосовместимых полимеров в общую цепь путем их сополимеризации позволило улучшить как противомикробную эффективность, так и биосовместимость. Очевидно, что основную роль иг-

рают процессы смачивания. Так, при использовании сополимера поливинил N-гексилпиридина бактерицидная активность была усилена за счет сополимеризации с гидрофильными и биосовместимыми мономерами 2-гидроксиэтилметакрилатом и полиэтиленгликолевый эфиром метилметакрилата [7].

В научной работе [8] показано, что сополимеры поливинилпиридина и полиметакрилатов обладают наибольшей эффективностью при сходных соотношениях заряд/алкильный хвост, и при этом пространственное разделение усиливало способность разрушать мембрану (рисунок 2).

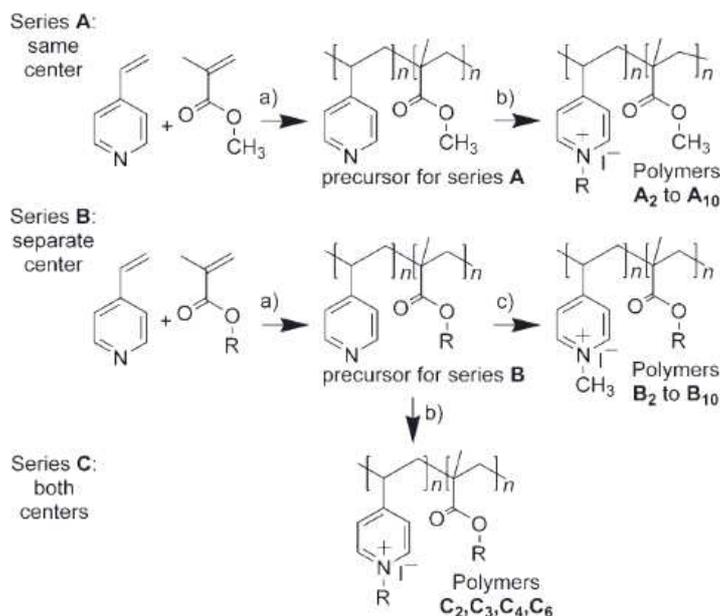


Рисунок 2. – Синтез катионных полимеров по [8]

Характер противоионов может влиять на антимикробную активность. Так, был синтезирован поли (4-винил-2-гидроксиэтилпиридиний) хлорид, и его противоанион Cl<sup>-</sup>, заменен Br<sup>-</sup>, OH<sup>-</sup>, SH<sup>-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, BF<sub>4</sub><sup>-</sup> или CF<sub>3</sub>COO<sup>-</sup> [9]. Антимикробную активность этих полимеров анализировали в отношении *Aspergillus niger*, *Mucor circenelioids* и *Bacillus coagulans*. Полимер, имеющий в качестве противодействия OH<sup>-</sup>, проявлял наибольшую активность со значениями: минимальная ингибирующая концентрация составила 1,04 и 0,52 мг/мл против грибов *M. Circenelioids*, *A. niger* соответственно, и 0,065 мг/мл против бактерии *B. coagulans*.

Другим семейством антимикробных ароматических/гетероциклических полимеров [9; 10] являются производные имидазола (рисунки 3, 4).

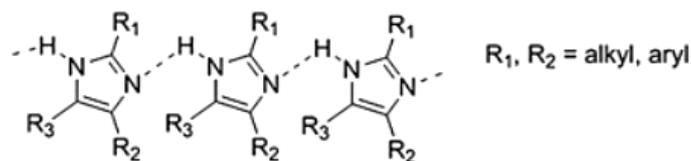


Рисунок 3. – Фрагмент полимерных производных имидазола

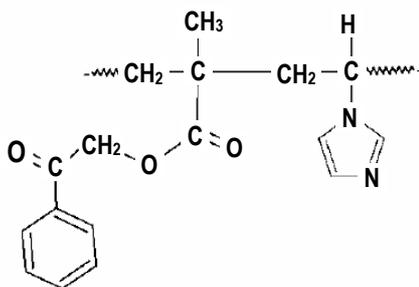


Рисунок 4. – Сополимер N-винилимидазола и фенилацилметакрилата

Важным является вопрос, связанный с влиянием молекулярной массы полимера на антимикробную активность. Как правило, с увеличением молекулярной массы активность падает. Так, например, в [12] показано, что с уменьшением молекулярной массы полимера (рисунок 5) примерно в 2,5 раза минимальная ингибирующая активность против *E. coli* и *S. aureus* возросла в 10...20 раз.

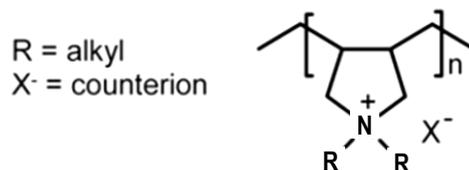


Рисунок 5. – Имидазольный полимер по [12]

Этими же авторами [12] показано, что замена четвертичной аммониевой группы в пирролидиниевом кольце группами NH<sub>2</sub><sup>+</sup> или CH<sub>3</sub>NH<sup>+</sup> в значительной степени влияет на антимикробную активность этих полимеров.

Полигексаметиленбигуанид (ПГМГ) в виде гидрохлорида или фосфата является химическим биоцидом и членом полимерного семейства гуанидинов (рисунок 6), он используется в качестве дезинфицирующего и антисептического средства в пищевой промышленности и весьма успешно – для дезинфекции бассейнов. Этот широко используемый биоцид был рассмотрен Агентством по охране окружающей среды США (EPA) и отмечен как имеющий очень низкий совокупный риск неблагоприятных последствий для здоровья населения или окружающей среды (EPA, 2005) [13–20].

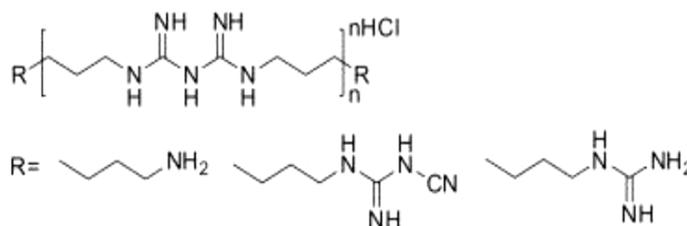


Рисунок 6. – Химическая структура ПГМГ

Вопрос о токсичности ПГМГ рассматривался в 2014 году в одной из последних работ по этой тематике [21], в которой было установлено, что ПГМБ не является генотоксичным и мутагенным, однако остаются проблемы, которые подлежат дальнейшим обсуждениям.

*Хитозан* – линейный полисахарид, полимерная цепь которого состоит из β-1,4-связанных остатков D-глюкозамина и N-ацетил-D-глюкозамина (рисунок 7). Впервые его антимикробные свойства начали изучать в 80-х годах прошлого века [22]. Однако систематически он изучается начиная с 2000 года. В частности, за 2018 год число публикаций по антимикробным свойствам хитозана составило 139 наименований.

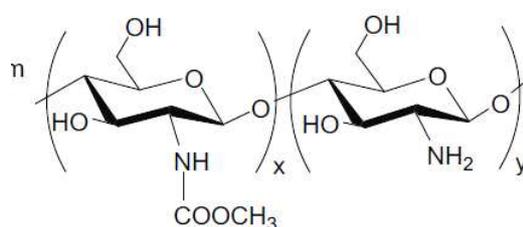


Рисунок 7. – Хитозан как частично деацетилированный хитин

В отличие от многих полимерных антимикробных материалов, которые наряду с антимикробной активностью обладают токсичностью, для хитозана токсичность не выявлена [23–33].

Ряд авторов отмечает чрезвычайно низкие значения минимальной ингибирующей концентрации хитозана и его производных (рисунок 8) [34–37]. При этом очевидно, что с уменьшением молекулярной массы хитозана его антимикробные свойства возрастают и приближаются к значениям, близким к наносеребру.

Bacteria tested	M.I.C. (%)			
	Chitin	Chitosan	N-acetyl chito-oligosaccharides	chito-oligosaccharides
<i>Escherichia coli</i>	0.01	0.01	0.003	0.003
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	> 0.1	0.05	0.003	0.003
<i>Staphylococcus aureus</i> ATCC 43300	0.03	0.03	0.003	0.003
<i>Staphylococcus aureus</i> ATCC 25923	0.03	0.03	0.003	0.003
<i>Salmonella typhimurium</i>	> 0.1	> 0.1	0.003	0.003
<i>Bacillus subtilis</i>	0.03	0.01	0.003	0.003
<i>Bacillus cereus</i>	0.03	0.01	0.003	0.003
<i>Vibrio cholerae</i>	0.01	0.01	0.003	0.003
<i>Shigella dysenteriae</i>	0.01	0.01	0.003	0.003
<i>Enterobacter agglomerans</i>	0.01	0.01	0.003	0.003
<i>Prevotella melaninogenica</i>	> 0.1	0.01	0.003	0.003
<i>Bacteroides fragilis</i>	0.006	0.006	0.003	0.003

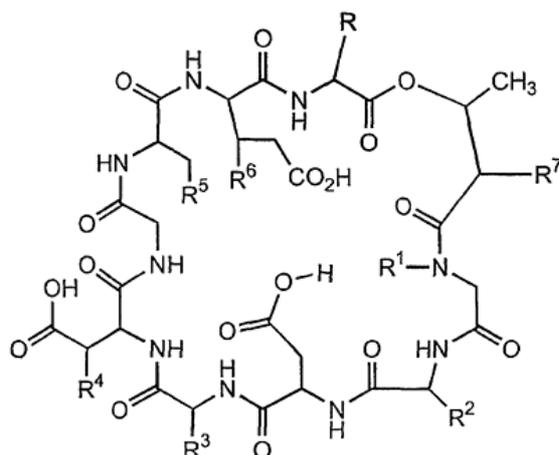
**Рисунок 8.** – Величины минимальной ингибирующей концентрации (МИС) для высоко- и низкомолекулярного хитина и хитозана

*Антимикробные свойства белков и пептидов* [38]. Основные пептиды ингибируют или активируют ряд ферментных систем, вызывают агглютинацию клеток, оказывают антибактериальное действие. Общим для этих веществ является наличие в их структуре большого числа основных кислот – лизина, аргинина, орнитина и диаминамасляной кислоты.

Литическая активность (способность разрушать клетку) этих пептидов связана с высокой плотностью положительного заряда на молекуле и высоким содержанием неполярных аминокислот. Подобные свойства проявляют протамин, спермин, лизоцим и основные гистоны.

*Полипептидные антибиотики* [39]. Особый класс полимеров, обладающих высокой антимикробной активностью, составляют некоторые природные пептиды и их синтетические аналоги, имеющие линейную или циклическую структуру и относительно небольшую молекулярную массу. Прежде всего, это сложные пептидные антибиотики группы грамицидина, тиронилина, аламетицина и полимиксина.

Другую группу составляют циклические депептиды – атипичные пептиды, молекулы которых построены из остатков amino- и оксикислот, соединенных между собой сложноэфирными и амидными связями, например депсипептид (рисунок 9).



**Рисунок 9.** – Циклический дипептид

Синтетические полимеры, содержащие в своей структуре основные аминокислоты, такие как: лизин (2,6-диаминогексановая кислота); орнитин (диаминовалериановая кислота); аргинин (2-амино-5-гуанидинпентановая кислота), оказались потенциальными антимикробными агентами. Эти полимеры и сополимеры получали полимеризацией N-карбоксиангидридов, несущих присоединенные амидными связями заместители, являющиеся производными аминокислот.

Таким образом, очевидно, что в последнее время значительно возрос интерес к полимерным антимикробным материалам. Так, если за период 1995–1999 годов, по данным сайта [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com),

количество публикаций, в которых в заголовках и ключевых словах упоминался этот термин, составляло 33 наименования, то уже за последний пятилетний период (2014–2018 гг.) их число превысило 1200. Причем эти публикации представлены в журналах с импакт-фактором до 5, например, таком известном, как *Carbohydrate Polymers*. В то же время выдача патентов имеет несколько иной характер. Всего за рассмотренный выше период было выдано 150 патентов, имеющих в составе ключевых слов термин «antimicrobial polymers». Из них за период 1995–1999 годов – 75 патентов, за 2014–2018 годов – 24. При этом следует отметить, что Азиатско-Тихоокеанский регион является крупнейшим рынком противомикробных пластмасс и по прогнозам сохранит эту позицию в течение следующих пяти лет, что обусловлено ростом потребления пластмасс и быстрой урбанизацией, которая стимулирует спрос на противомикробные пластмассы в указанном регионе.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Kenaway, El-Refaie. The Chemistry and Applications of Antimicrobial Polymers: A State of the Art Review / Kenaway, El-Refaie, S.D. Worley, Roy Broughton // *Bio Macromolecules*. – 2007. – V. 8, № 5. – P. 1359–1384.
2. Polymer surfaces derivatized with poly(vinyl-Nhexylpyridinium) kill airborne and waterborne bacteria / J.C. Tiller [et al.] // *Biotechnol Bioeng*. – 2002. – V. 79. – P. 465–471.
3. Designing surfaces that kill bacteria on contact / J.C. Tiller [et al.] // *Proc Natl Acad Sci USA*. – 2001. – V. 98. – P. 5981–5985.
4. Antibacterial activities of polystyrene-block-poly(4-vinyl pyridine) and poly(styrene-random-4-vinyl pyridine) / E.S. Park [et al.] // *Eur. Polym. J.* – 2004. – V. 40. – P. 2819–2822.
5. Li, G. A study of pyridinium-type functional polymers. Behavioral features of the antibacterial activity of insoluble pyridinium-type polymers / G. Li, J. Shen // *J. Appl. Polym. Sci.* – 2000. – V. 78. – P. 676–684.
6. Synergistic activity of hydrophilic modification in antibiotic polymers / P.H. Sellenet [et al.] // *Biomacromolecules*. – 2007. – V. 8. – P. 19–23.
7. Synergistic activity of hydrophilic modification in antibiotic polymers / P.H. Sellenet [et al.] // *Biomacromolecules*. – 2007. – V. 8. – P. 19–23.
8. Sambhy, V. Antibacterial and hemolytic activities of pyridinium polymers as a function of the spatial relationship between the positive charge and the pendant alkyl tail / V. Sambhy, B.R. Peterson, A. Sen // *Angew. Chem. Int. Ed.* – 2008. – V. 47. – P. 1250–1254.
9. Tuning anti-microbial activity of poly(4-vinyl 2-hydroxyethyl pyridinium) chloride by anion exchange reactions / S. Sharma [et al.] // *J. Mater. Sci Mater. Med.* – 2010. – V. 21. – P. 717–724.
10. Anderson, E.B. Imidazole- and imidazolium-containing polymers for biology and material science applications / E.B. Anderson, T.E. Long // *Polymer*. – 2010. – V. 51. – P. 2447–2454.
11. Soykan, C. Microbial screening of copolymers of N-vinylimidazole with phenacyl methacrylate: synthesis and monomer reactivity ratios / C. Soykan, R. Coskun, A. Delibas // *J. Macromol. Sci. Pure Appl. Chem.* – 2005. – V. 42. – P. 1603–1619.
12. Secondary and tertiary polydiallylammonium salts: novel polymers with high antimicrobial activity / L.M. Timofeeva [et al.] // *Biomacromolecules*. – 2009. – V. 10. – P. 2976–2986.
13. Walczak, M. The effect of polyhexamethylene guanidine hydrochloride (PHMG) derivatives introduced into polylactide (PLA) on the activity of bacterial enzymes / Walczak M., Richert A. & A. Burkowska-But // *J. Ind. Microbiol. Biotechnol.* – 2014. – V. 41. – P. 1719–1724.
14. Structural characterization and antibacterial activity of oligoguanidine (polyhexamethylene guanidine hydrochloride) / D. Wei [et al.] // *Materials Science and Engineering*. – 2009. – V. 9. – P. 1776–1780.
15. Roth, B. Polihexanide for wound treatment – how it began / B. Roth, F.H.H. Brill // *Skin Pharmacol. Physiol.* – 2010. – V. 23 (1). – P. 4–6.
16. Polyhexamethylene guanidine hydrochloride-based disinfectant: a novel tool to fight meticillin-resistant staphylococcus aureus and nosocomial infections / M.K. Oulé [et al.] // *J. Med. Microbiol.* – 2008. – V. 57. – P. 1523–1528.
17. Polybiguanides, particularly amethylene biguanide, have activity against human immunodeficiency virus type 1 / F.C. Krebs [et al.] // *Biomed. Pharmacol.* – 2005. – V. 59. – P. 438–445.
18. O'Malley, L.P. Microbial degradation of the biocide polyhexamethylene biguanide: isolation and characterization of enrichment consortia and determination of degradation by measurement of stable isotope incorporation into DNA / L.P. O'Malley, C.H. Shaw, A.N. Collins // *Journal of Applied Microbiology*. – 2007. – V. 103. – P. 1158–1169.
19. Butcher, M. PHMB: an effective antimicrobial in wound bioburden management / M. Butcher // *British Journal of Nursing*. – 2012. – V. 21 (12). – P. 16–21.
20. De Paula, G.F. Physical and Chemical Characterization of Poly(hexamethylene biguanide) Hydrochloride / G.F. de Paula, G.I. Netto, L.H.C. Mattoso // *Polymers*. – 2011. – V. 3. – P. 928–941.

21. Study of Epigenetic Properties of Poly (HexaMethylene Biguanide) Hydrochloride (PHMB) / E.E. Creppy [et al.] // *Int. J. Environ. Res. Public Health*. – 2014. – V. 11. – P. 8069–8092.
22. Atomis force microscopy of gastrin mucin and chitosan mucoadhesive systems / M.P. Deacon [et al.] // *Biochem. J.* – 2000. – V. 348. – P. 557–563.
23. Quality assurance in pathology for rodent carcinogenicity studies / G.A. Boorman [et al.]. In *Handbook of Carcinogen Testing* (H.A. Milman and E.K. Weisburger, Eds.) // Noyes Publications, Park Ridge, NJ. – 1985. – P. 345–357.
24. Carvalho, T.S. Combined effect of a fluoride-, stannous- and chitosan-containing toothpaste and stannous-containing rinse on the prevention of initial enamel erosion-abrasion / Carvalho T.S., Lussi A. // *J. Dent.* – 2014. – V. 42. – P. 450–459.
25. Chae, S.Y. Influence of molecular weight on oral absorption of water soluble chitosans / S.Y. Chae, Jang M.-K., J.-W. Nah // *J. Control. Release*. – 2005. – V. 102. – P. 383–394.
26. Cheng, Q. Prenatal and developmental effect of high molecular weight chitosan (HMWCS) to mice / Q. Cheng, J. Zhang, W. Xia // *Regul. Toxicol. Pharmacol.* – 2013. – V. 65. – P. 294–303.
27. Chiang, M.-T. Effect of dietary chitosans with different viscosity on plasma lipids and lipid peroxidation in rats fed on a diet enriched with cholesterol / M.-T. Chiang, H.-T. Yao, H.-C. Chen // *Biosci. Biotechnol. Biochem.* – 2000. – V. 64. – P. 965–971.
28. Continuous and massive intake of chitosan affects mineral and fat-soluble vitamin status in rats fed on a high-fat diet / K. Deuchi [et al.] // *Biosci. Biotechnol. Biochem.* – 1995. – V. 59. – P. 1211–1216.
29. Deuchi, K. Effect of the viscosity or deacetylation degree of chitosan on fecal fat excreted from rats fed on a high-fat diet / K. Deuchi [et al.] // *Biosci. Biotechnol. Biochem.* – 1995. V. 59. – P. 781–785.
30. Dixon, W.J. Jr. *Introduction to Statistical Analysis*, 2nd ed., McGraw-Hill Book Company, Inc. / W.J. Dixon, and F.J. Massey. – New York. – P. 276–278, 412.
31. Domard, A. Preparation and characterization of fully deacetylated chitosan / A. Domard, M. Rinaudo // *Int. J. Biol. Macromol.* – 1983. – V. 5. – P. 49–52.
32. Effects of habitual chitosan intake on bone mass, bone-related metabolic markers and duodenum CaBP D9K mRNA in ovariectomized SHRSP rats / C.-Y. Yang [et al.] // *J. Nutr. Sci. Vitaminol (Tokyo)*, 2002. – V. 48. – P. 371–378.
33. The controlling biodegradation of chitosan fibers by N-acetylation in vitro and in vivo / Y.M. Yang [et al.] // *J. Mater. Sci. Mater. Med.* – 2007. – V. 18. – P. 2117–2121.
34. Monarul, M.D. In vitro antibacterial activity of shrimp chitosan against salmonella paratyphi and staphylococcus aureus / M.D. Monarul, Dhan M.D., K.R.M. Masum // *Journal of Bangladesh Chemical Society*, 2011. – V. 24 (2). – P. 185–190.
35. Annaian, S. Preparation, characterization and antibacterial activity of chitosan and phosphorylated chitosan from cuttlebone of *Sepia kobeensis* / S. Annaian, K. Kandasamy, N. Lakshman // *Biotechnology Reports*. – 2016. – V. 9. – P. 25–30.
36. Антибактериальные и антиоксидантные свойства хитозана и его производных / Л.А. Иванушко [и др.] // *Тихоокеанский медицинский журнал*. – 2009. – № 3. – С. 82–85.
37. Взаимодействие бактериальных эндотоксинов с хитозаном. Влияние структуры эндотоксина, молекулярной массы хитозана и ионной силы раствора на процессы комплексообразования / В.Н. Давыдова [и др.] // *Биохимия*. – 2000. – Т. 65, № 9. – С. 1278–1287.
38. Афиногенов, Г.Е. Антимикробные полимеры / Г.Е. Афиногенов, Е.Ф. Панарин. – СПб. : Гиппократ, 1993. – 264 с.
39. Новые депсипептиды и способы их получения : пат. RU № 2348647 / Дж. Финн, М. Моритко, Ян Б. Парр, М. Джанглвл. – Оpubл. 10.03.2009.

Поступила 15.02.2019

## ANTIMICROBIAL PROPERTIES OF CATIONIC POLYELECTROLYTES

M. ZILBERGLEIT, M. SHAUCHUK, S. NESTSERAVA, S. YAKUBOVSKIY

*The article summarizes the results of the analysis of literature data on studies of polymeric materials with antimicrobial properties. Four groups of polymeric antimicrobial materials are considered, as well as their most significant representatives: polymeric materials with a quaternary nitrogen atom, polymers of the pyridine type, imidazole derivatives, chitosan, polypeptide antibiotics.*

**Keywords:** polymeric antimicrobial materials, polyvinylpyridine, imidazole, chitosan, polypeptide antibiotics.

УДК 62:658.382.3

**НАПРАВЛЕНИЯ ПОВЫШЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ  
ОБОРУДОВАНИЯ, РАБОТАЮЩЕГО ПОД ИЗБЫТОЧНЫМ ДАВЛЕНИЕМ  
НА НЕФТЕПЕРЕРАБАТЫВАЮЩЕМ ПРЕДПРИЯТИИ****К.Ю. КОЖЕМЯТОВ; канд. техн. наук, доц. Ю.А. БУЛАВКА  
(Полоцкий государственный университет)**

*Представлены результаты анализа сроков эксплуатации оборудования, работающего под избыточным давлением на белорусском нефтеперерабатывающем предприятии, предложены направления повышения промышленной безопасности при работе с данным типом оборудования. Установлено, что высокому риску повышенного износа в процессе эксплуатации, подвержены штуцеры с условным проходом до Ду100, основной металл и металл сварных швов корпуса оборудования. Частая замена штуцеров с малым условным проходом связана с небольшим запасом между исполнительной и отбраковочной толщинами патрубков штуцеров. Установлен средний срок эксплуатации оборудования, работающего под избыточным давлением на исследуемом предприятии.*

**Ключевые слова:** нефтеперерабатывающее предприятие; промышленная безопасность; аварийность; оборудование, работающее под избыточным давлением.

**Введение.** Ежегодно в мире на объектах нефтегазовой промышленности происходят около 20 тысяч крупных аварий, причем в последние годы отмечается рост аварийности в нефтеперерабатывающей промышленности [1]. В частности, это такие аварии, как: авария в марте 2005 года на установке изомеризации одного из крупнейших нефтеперерабатывающих заводов США, принадлежащих компании ВР в Тексас-Сити. Произошел мощный взрыв, за которым последовал сильный пожар, 15 человек погибли и свыше 70-ти получили ранения; 29 мая в 2008 году в водородной компрессорной установки по вторичной переработке нефти Киришского НПЗ произошел взрыв водородсодержащей смеси, а затем пожар. На месте погиб один человек, четверо скончались в больнице, ущерб от аварии составил 107 млн руб.; 7 августа 2011 года возник пожар на Хабаровском НПЗ, горело разлившееся топливо и установка насосной станции на общей площади 50 м<sup>2</sup>. Пострадали 5 человек, из которых 2 погибли; 15 июня 2014 года на установке газодифракционирования Ачинского НПЗ произошел пропуск углеводородного газа, который привел к объемному взрыву и пожару. Погибли 8 человек, 7 – госпитализированы, всего пострадавших – 24 человека, ущерб составил примерно 800 млн долл.

В Республике Беларусь проводится целенаправленная государственная политика в области промышленной безопасности. Однако состояние аварийности на производстве продолжает оставаться сложной социально-экономической проблемой [2–14]. На территории Беларуси также происходили крупные аварии. Например, 18 июня 2016 года на заводе «Полимир» ОАО «Нафтан» в цеху по производству этилена и пропилена при проведении пусковых технологических операций произошла разгерметизация трубопровода подачи этан-этиленовой фракции с последующим возгоранием по причине неуправляемой реакции гидрирования этан-этиленовой фракции, цех не функционирует и в настоящее время.

Статистические данные показывают, что крупные аварии на НПЗ в большинстве случаев происходят из-за утечек горючей жидкости и пара или углеводородного газа, возникающих в основном по следующим причинам (в порядке убывания) [4; 5]: нарушение правил эксплуатации, технологического регламента; дефекты строительно-монтажных работ, некачественный монтаж и ремонт оборудования; дефекты изготовления оборудования и материалов; отступление от требований проектно-технической документации; износ оборудования, утечки продукта через прокладки, торцовые уплотнения, сальники, коррозия оборудования, прогар труб в печах; конструктивное несовершенство оборудования; внешние природные и техногенные воздействия; несовершенство проектных решений, переполнение промканализации; переполнение емкостей, резервуаров и др.

Цель данного исследования – анализ эксплуатации на НПЗ оборудования, работающего под избыточным давлением; разработка направления по повышению промышленной безопасности.

**Методы исследований.** В качестве объекта исследования рассмотрено оборудование, работающее под избыточным давлением на белорусском нефтеперерабатывающем предприятии полного цикла, изучено оборудование колонного, емкостного и реакторного типов; теплообменное оборудование (в том числе кристаллизаторы), сепараторы и фильтры.

Экспертно-статистическими и аналитическими методами выполнен комплексный анализ ремонтной документации за период 2008–2018 годов и сроков эксплуатации оборудования, работающего под избыточным давлением на белорусском нефтеперерабатывающем предприятии.

**Результаты и их обсуждение.** Оборудование колонного типа на исследуемом предприятии составляет 6% от общего числа оборудования на предприятии. К данному типу согласно ГОСТ 31838-2012 отно-

сят цилиндрические вертикальные сосуды постоянного или переменного сечения, оснащенные внутренними тепло- и массообменными устройствами (тарелками или насадкой), а также вспомогательными узлами (ввода жидкости, устройствами для размещения насадочных элементов и т.д.), обеспечивающими проведение технологического процесса (например, ректификации или прямого теплообмена между паром (газом), жидкостью и др.). Анализ ремонтной документации за период 2008–2018 годов показал, что наиболее высокая частота работ по замене: штуцеров с условным проходом до Ду100 (37% объема работ); внутренних устройств (23%); штуцеров с условным проходом Ду100 и более (21%). При этом следует отметить, что реже выполняются работы по ремонту основного металла и металла сварных швов корпуса (около 19% объема работ).

*Сепараторы* составляют 6% от общего числа изучаемого оборудования, относятся к оборудованию отстойного типа, схожи по конструкции с аппаратами колонного типа, но отличаются меньшими размерами, снабжены меньшим количеством тарелок, либо вместо тарелок установлена переливная пластина для разделения жидкостей по плотности. По максимальной частоте проводимых видов ремонтов сепараторов выделяются работы по замене штуцеров с условным проходом до Ду100 (76% объема работ), небольшой процент приходится на остальные виды ремонтов (ремонт основного металла и металла сварных швов корпуса – 11%; замена штуцеров с условным проходом Ду100 и более – 9%; замена внутренних устройств – 4%).

*Фильтры* составляют 7% от общего числа изучаемого оборудования, относятся к аппаратам для осуществления процесса фильтрования. Наибольшей частотой характеризуются ремонты на фильтрах по замене штуцеров с условным проходом до Ду100 (71% объема работ), незначительный процент приходится на остальные виды ремонтов (ремонт основного металла и металла сварных швов корпуса – 19%; замена штуцеров с условным проходом Ду100 и более – 10%), что обусловлено небольшим средним сроком эксплуатации данного вида оборудования.

*Оборудование реакторного типа* составляет 2% от общего числа изучаемого оборудования, относится к сосудам, в которых протекают химические реакции, в том числе в присутствии катализатора. Характеризуются, как правило, наличием высокого давления и температуры. По максимальной частоте проводимых видов ремонтов реакторов выделяются работы по ремонту основного металла и металла сварных швов защитного кожуха, подвергнутого ремонту (75% объема работ), 13% работ приходится на замену внутренних устройств реакторов.

*Оборудование емкостного типа* составляет 41% от общего числа изучаемого оборудования, относится к сосудам, герметично закрытым емкостям (подразделяются на стационарно установленные и передвижные) согласно ТР ТС 032/2013, предназначенные для ведения химических, тепловых и других технологических процессов, а также для хранения и транспортировки газообразных, жидких и других веществ. Наибольшей частотой характеризуются ремонты оборудования емкостного типа, включающие замену штуцеров с условным проходом до Ду100 (70% объема работ); 15% объема работ приходится на замену штуцеров с условным проходом Ду100 и более и ремонт основного металла и металла сварных швов корпуса.

*Оборудование теплообменного типа* составляет 37% от общего числа изучаемого оборудования, относится к оборудованию, предназначенному согласно ГОСТ 31842-2012 для передачи тепла при неизотермических условиях эксплуатации. По максимальной частоте проводимых видов ремонтов оборудования теплообменного типа выделяются работы по ремонту основного металла и металла сварных швов корпуса (31% объема работ), работы по замене штуцеров с условным проходом до Ду 100 (30% объема работ) и замене и ремонту перегородок распределительных камер (24% объема работ). Специфической разновидностью теплообменного оборудования являются скребковые кристаллизаторы [15–17]. На исследуемом предприятии такое оборудование составляет всего 1% от общего числа оборудования, однако средний срок эксплуатации кристаллизаторов составляет 49,2 года. Анализ документации по ремонтам, проводимым на кристаллизаторах, показал, что единственным видом ремонта служит замена основных изнашиваемых частей данного типа оборудования – внутренних либо, реже, наружных труб.

В таблице приведены средние сроки эксплуатации оборудования, работающего под избыточным давлением на исследуемом белорусском нефтеперерабатывающем предприятии.

Таблица. – Сроки эксплуатации оборудования, работающего под избыточным давлением на НПЗ

Тип оборудования, работающего под избыточным давлением	Средний срок эксплуатации на НПЗ, лет
Оборудование колонного типа	38,6
Оборудование емкостного типа	34,8
Оборудование реакторного типа	32,8
Теплообменное оборудование	31,2
Сепараторы	28,3
Фильтры	25,0

Анализ данных таблицы показал, что наиболее длительный срок эксплуатации принадлежит оборудованию колонного, емкостного и реакторного типов. При этом заявленный разработчиком срок службы сосудов, работающих под избыточным давлением, как правило, составляет 20 лет.

Комплексный анализ жизненного цикла оборудования, работающего под избыточным давлением на белорусском нефтеперерабатывающем предприятии, показал, что высокому риску повышенного износа в процессе эксплуатации подвержены требующие ремонта штуцеры с условным проходом до Ду100, основной металл и металл сварных швов корпуса различного оборудования.

Причина частой замены штуцеров с малым условным проходом связана с небольшим запасом между исполнительной и отбраковочной толщинами патрубков штуцеров. Так, например, для штуцера Ду50 по расчету на прочность достаточно и наиболее часто применяется труба с номинальной толщиной 4 мм. В соответствии с Инструкцией по ревизии, ремонту и отбраковке, принятой на исследуемом предприятии, отбраковочная толщина для патрубка штуцера Ду50 составляет 2,0 мм, если в расчете на прочность не указано иное, большее значение. Исполнительная же толщина стенки в результате погрешности при изготовлении зачастую составляет порядка 3,8...3,9 мм. При этом на практике такие штуцеры бракуются при толщине 2,5...2,7 мм как приближающиеся к отбраковочным для повышения надежности и безотказности работы в межремонтный период и недопущения останова технологической установки из-за пропуска продукта. В таком случае даже при скорости коррозии до 0,1 мм/год, толщины штуцера на практике недостаточно даже на заявленный срок службы сосуда (обычно составляет 20 лет). Из практического опыта замена таких штуцеров при ремонте на толстостенные (порядка 6...8 мм) приводит к безотказной работе данных узлов на протяжении всего жизненного цикла оборудования вплоть до списания.

Таким образом, в качестве направления повышения промышленной безопасности оборудования, работающего под избыточным давлением, целесообразно, по нашему мнению, для нового оборудования согласовывать с разработчиками увеличение толщины штуцеров с условным проходом до Ду100. При этом, несмотря на незначительное увеличение стоимости такого оборудования, можно добиться безремонтной его эксплуатации даже после окончания назначенного срока службы.

Причинами ремонта основного металла и металла сварных швов являются скрытые металлургические дефекты и дефекты сварных швов, не выявленные при изготовлении сосуда (аппарата), а также агрессивное воздействие рабочей среды сосуда (аппарата), образование застойных зон, накопление частиц твердой фазы из рабочей среды (окалина, механические примеси и др.), которые контролируются визуально и с помощью ультразвуковой толщинометрии. В местах, вызывающих подозрение на наличие дефектов, дополнительно может проводиться ультразвуковая или цветная дефектоскопия.

Представляется, что для минимизации количества ремонтов данного типа целесообразно: усилить входной контроль для вновь монтируемого оборудования, а также контроль за подбором материала для конкретной рабочей среды и рабочих параметров, таких как температура и давление; обеспечить четкое соблюдение норм технологического регламента; для вновь проектируемого оборудования применять современные технические решения для минимизации количества застойных зон.

**Заключение.** По итогам проведенного исследования установлен средний срок эксплуатации оборудования, работающего под избыточным давлением на исследуемом предприятии: дольше всего используется оборудование колонного типа (38,6 лет) и емкостного типа (34,8 года), реактора (32,8 года), оборудование теплообменного типа (31,2 года).

Полученные результаты по комплексному анализу жизненного цикла оборудования, работающего под избыточным давлением, могут быть эффективно использованы для повышения уровня промышленной безопасности, снижения риска аварий на нефтеперерабатывающих и нефтехимических предприятиях.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Bulauka, Y.A. Emergency sorbents for oil and petroleum product spills based on vegetable raw materials / Y.A. Bulauka, K.I. Mayorava, Z. Ayoub // IOP Conference Series : Materials Science and Engineering. 2018. – Vol. 451 (1). art. no. 012218.
2. Булавка, Ю.А. Проблема выбора наиболее опасного аппарата для оценки взрывоопасности технологического блока на нефтеперерабатывающих и нефтехимических производствах / Ю.А. Булавка // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В, Промышленность. Прикладные науки. – 2016. – № 11. – С. 125–129.
3. Бирюк, В.А. Методы оценки рисков в системе управления промышленной безопасностью предприятий нефтехимической промышленности / В.А. Бирюк, Ю.А. Булавка, Р.Н. Иманов // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Республики Беларусь. – 2018. – № 4. – Т. 2. – С. 437–445.
4. Апостериорная оценка состояния аварийности на нефтеперерабатывающем предприятии / Ю.А. Булавка, [и др.] // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В, Промышленность. Прикладные науки. – 2012. – № 9. – С. 122–128.

5. Булавка Ю.А. Анализ инцидентов на нефтеперерабатывающем предприятии / Ю.А. Булавка, О.О. Смиловенко, Е.В. Шашевич // Вестник Командно-инженерного института МЧС. – 2012. – № 2(16). – С. 69–76.
6. Булавка, Ю.А. Анализ производственного травматизма на нефтеперерабатывающем предприятии / Ю.А. Булавка // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В, Промышленность. Прикладные науки. – 2011. – № 3. – С. 130–137.
7. Булавка, Ю.А. Современное состояние и совершенствование методики экспертной оценки профессионального риска на рабочих местах / Ю.А. Булавка // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В, Промышленность. Прикладные науки. – 2013. – № 3. – С. 156–163.
8. Булавка, Ю.А. Концептуальный подход к оценке профессионального риска на опасных производственных объектах / Ю.А. Булавка, О.О. Смиловенко // Чрезвычайные ситуации: образование и наука. – 2013. – Т. 8, № 1. – С. 125–131.
9. Булавка, Ю.А. Совершенствование технологии экспертной оценки профессионального риска на рабочих местах / Ю.А. Булавка // Безопасность жизнедеятельности. – 2013. – № 7. – С. 9–15.
10. Булавка, Ю.А. Развитие комплексной оценки профессионального риска путем учета суммарной вредности условий труда / Ю.А. Булавка // Гигиена и санитария. – 2013. – № 4. – С. 47–54.
11. Булавка, Ю.А. Нечетко-множественный подход к экспертной оценке профессиональных рисков на примере условий труда работников нефтеперерабатывающего завода / Ю.А. Булавка // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия С, Фундаментальные науки. – 2013. – № 12. – С. 59–66.
12. Покровская, С.В. Моделирование последствий аварий на опасных производственных объектах нефтеперерабатывающей промышленности с использованием программного комплекса ТОХИ<sup>Risk</sup> / С.В. Покровская, Ю.А. Булавка, Д.В. Галкина // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В, Промышленность. Прикладные науки. – 2016. – № 3. – С. 173–178.
13. Булавка, Ю.А. Факторы априорного профессионального риска для работников нефтеперерабатывающих производств / Ю.А. Булавка // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В, Промышленность. Прикладные науки. – 2017. – № 3. – С. 135–140.
14. Старовойтов, И.Г. Методы оценки риска в системе управления охраной труда / И.Г. Старовойтов, В.А. Бирюк, Ю.А. Булавка // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Республики Беларусь. – 2018. – № 1, Т. 2. – С. 5–17.
15. Кожемятов, К.Ю. Проблемы обеспечения безопасности при эксплуатации теплообменного оборудования на НПЗ / К.Ю. Кожемятов, Ю.А. Булавка // Интенсификация тепло-массообменных процессов, промышленная безопасность и экология : материалы пятой Всероссийской студенческой науч.-техн. конф., Казань, 23–25 мая 2018 г. – Казань : Изд-во Казан. ун-та, 2018. – С. 403–406.
16. Кожемятов, К.Ю. Повышение надежности эксплуатации теплообменного оборудования на нефтеперерабатывающем заводе / К.Ю. Кожемятов, Ю.А. Булавка // Нефть и газ – 2018 : сб. докл. 72-й междунар. молодежной науч. конф., Москва, 23–26 апр. 2018 г. Т. 2. – М. : Издат. центр РГУ нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина, 2018. – С. 189.
17. Кожемятов, К.Ю. Анализ практического опыта эксплуатации теплообменного оборудования на нефтеперерабатывающем заводе / К.Ю. Кожемятов, Ю.А. Булавка // Безопасность, современные технологии в энергетике : всероссийская специализированная науч.-практ. конф. молодых специалистов (с международным участием), 29–30 марта 2018 г. : сб. докл. – М. : ВТИ. – 2018. – С. 299–304.

Поступила 02.01.2019

## DIRECTIONS TO IMPROVE INDUSTRIAL SAFETY OF EQUIPMENT OPERATING UNDER EXCESSIVE PRESSURE ON OIL REFINING ENTERPRISE

**K. KOZHEMYATOV, Y. BULAUKA**

*The results of the analysis of the service life of equipment operating under excessive pressure at the Belarusian oil refinery are presented, directions for improving industrial safety when working with this type of equipment are proposed. It has been established that fittings with conditional passage up to DN100, the base metal and metal of the welds of the equipment body are exposed to increased wear during operation. Frequent replacement of fittings with a small conditional passage is connected with a small margin between the executive and rejection thicknesses of fittings' nozzles. The average service life of equipment operating under excessive pressure at the studied enterprise was established: types of equipment used the longest are column type, capacitive type, reactor and the heat exchange type.*

**Keywords:** oil refinery, industrial safety, accident rate, equipment operating under excessive pressure.

УДК 628.336.3

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОБРАБОТКИ ДЛЯ ИНТЕНСИФИКАЦИИ И ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ БИОЛОГИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД И УЛУЧШЕНИЯ СВОЙСТВ СЫРОГО ОСАДКА****И.Э. ГОЛОВНЕВ**

(УП «Витебскводоканал»)

канд. техн. наук, доц. В.Н. МАРЦУЛЬ

(Белорусский государственный технологический университет, Минск)

*Представлены результаты моделирования очистных сооружений, позволяющие прогнозировать изменение качественного и количественного состава осадков при использовании обработанного ультразвуком активного ила для осаждения взвешенных веществ в первичных отстойниках, а также для извлечения тяжелых металлов из избыточного активного ила. Проанализированы результаты промышленных испытаний разработанной технологии оптимальной обработки ультразвуком активного ила и сырого осадка в процессе биологической очистки сточных вод. Выявлено, что при использовании методов обработки активного ила и сырого осадка ультразвуком требуется соблюдать определенные условия. В большинстве случаев целесообразно ультразвуковую обработку проводить с использованием гидродинамического излучателя, что позволяет более точно дозировать затраты энергии и время обработки для достижения желаемого результата.*

**Ключевые слова:** избыточный активный ил, сырой осадок, ультразвуковая обработка, очистка сточных вод.

**Введение.** Повышение эффективности работы очистных сооружений канализации и создание предпосылок для экологически безопасного использования осадков сточных вод на основе интенсификации процессов биологической очистки сточных вод возможно с использованием ультразвуковой обработки активного ила и сырого осадка.

Ультразвуковая обработка при определенных расходах энергии увеличивает флокулирующую способность активного ила. Для улучшения флокулирующих свойств в зависимости от содержания сухих веществ в активном иле может использоваться ультразвуковая обработка с применением гидродинамического и магнитострикционного излучателей при расходе энергии, не превышающем 1500 Дж/г твердой фазы активного ила. При этом целесообразно активный ил перед использованием не разделять на кек и надилую воду. Расход обрабатываемого активного ила подбирается методом пробного коагулирования в зависимости от содержания взвешенных веществ в сточных водах и характеристики образующегося активного ила.

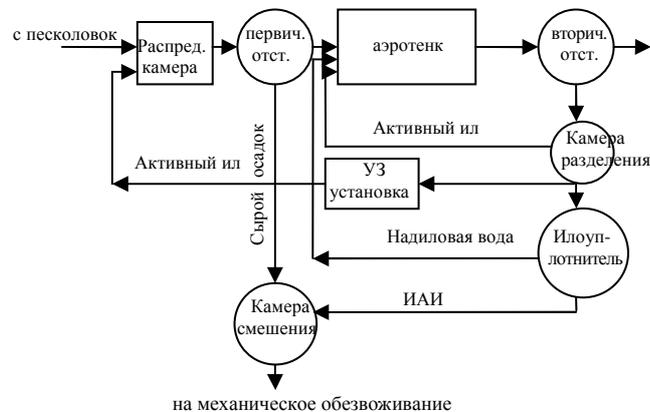
Ультразвуковая обработка активного ила положительно сказывается на его способности к микробному разложению органических соединений, скорости и полноте протекания биологической очистки, так как в очищаемые сточные воды переходят ферменты, низкомолекулярные легко разлагаемые бактериями активного ила органические вещества. В результате ультразвуковой обработки происходит повышение клеточной проницаемости, усиление активности ферментов и целостности флокул активного ила.

Таким образом, ультразвуковая обработка существенно изменяет состав твердой и жидкой фазы активного ила за счет перехода в жидкую фазу тяжелых металлов, фосфатов как в составе дисперсных частиц, так и в раствор. Обработка ультразвуком приводит к увеличению выхода летучих жирных кислот (ЛЖК) и улучшает качественные характеристики жидкой фазы. Растворимая часть органических веществ служит предпочтительным питанием для активного ила и наиболее дефицитным компонентом сточных вод. От 40 до 75% органических веществ, поступающих на очистку, находятся во взвешенном и коллоидном состоянии, они могут быть удалены в первичных отстойниках, что создает дефицит полноценного питания активного ила и ухудшает качество сырого осадка, загрязняя окружающую среду. Органические вещества, находящиеся в сыром осадке, можно частично перевести в растворимые формы в процессе ацидофикации и ультразвуковой обработки сырого осадка.

**Основная часть.** Схемы очистки сточных вод для повышения эффективности извлечения взвешенных веществ из сточных вод при использовании ультразвуковой установки возможны в двух вариантах: с ультразвуковой обработкой части циркулирующего активного ила (рисунок 1) и с ультразвуковой обработкой избыточного активного ила (рисунок 2).

В первом случае объем обработанного активного ила для обеспечения повышения степени очистки, как и достигаемый эффект, зависит от способа удаления взвешенных веществ – обычное отстаивание сточных вод после дозирования обработанного активного ила или осветление во взвешенном слое осадка. Расход обработанного ультразвуком активного ила, обеспечивающий интенсификацию осаждения взвешенных веществ, составляет 1...5% об, при этом степень очистки повышается на 5...10%.

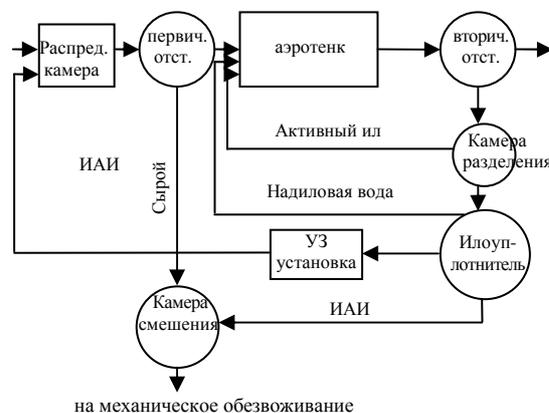
Во втором случае изъятие взвешенных веществ во взвешенном слое осадка обеспечивает повышенные степени очистки на 30...40%. Расход активного ила при этом составляет до 7% от объема циркулирующего ила, возвращаемого на биологическую очистку после вторичных отстойников.



**Рисунок 1.** – Схема очистки сточных вод с использованием ультразвуковой обработки части циркулирующего активного ила для повышения эффективности удаления взвешенных веществ из сточных вод на стадии их отстаивания в первичных отстойниках

Для условий очистных сооружений УП «Витебскводоканал» при расходе сточных вод, поступающих в первичные отстойники 70 тыс. м<sup>3</sup>/сутки, требуется обработать ультразвуком и подать в сточные воды 3500 м<sup>3</sup>/сутки активного ила. Это составляет 5,1...9,6% от объема циркулирующего активного ила. При этом увеличится расход сточных вод, поступающих в отстойники, на 5%. При концентрации 7 г/дм<sup>3</sup> активного ила, подаваемого на ультразвуковую обработку, содержание ХПК увеличится на 40...42 мг О<sub>2</sub>/дм<sup>3</sup>.

Активный ил, обработанный на ультразвуковой установке с магнитострикционным излучателем, подается в распределительную камеру первичных отстойников. Для обработки 700 м<sup>3</sup> в сутки активного ила требуется установить ультразвуковые излучатели с суммарной мощностью 25,2 кВт. Объем камеры, в которой установлены излучатели, обеспечивающей требуемый режим обработки, составляет 0,12 м<sup>3</sup>.



**Рисунок 2.** – Схема очистки сточных вод с использованием ультразвуковой обработки избыточного активного ила для повышения эффективности удаления взвешенных веществ

При использовании избыточного активного ила для интенсификации процесса отстаивания в первичных отстойниках в условиях УП «Витебскводоканал» обрабатывается ультразвуком 200...250 м<sup>3</sup> в сутки. При этом объем сточных вод, поступающих на отстаивание, увеличится на 0,3%, а ХПК возрастет на 10%.

Схема очистки сточных вод с использованием ультразвуковой обработки активного ила для интенсификации биологической очистки сточных вод приведена на рисунке 3.

Для интенсификации процессов биологической очистки необходимо обработать до 10% объема циркулирующего в системе очистки активного ила с интенсивностью обработки 3,15 Вт/см<sup>3</sup> в течение 5...15 секунд для условий УП «Витебскводоканал». С учетом расхода циркулирующего активного ила обрабатываемый объем должен составлять до 6350 м<sup>3</sup>/сутки. Прирост показателя ХПК, который вносится в аэротенк с циркулирующим активным илом, составит до 10%. Гидравлическая нагрузка на аэротенки при этом не возрастает, так как обрабатывается часть возвратного циркулирующего ила. В результате



Как видно из приведенных данных (см. таблицу 1), в осадках сточных вод УП «Витебскводоканал», в том числе в избыточном активном иле, наблюдается превышение содержания металлов по меди и цинку по сравнению с допустимыми концентрациями при использовании осадков сточных вод в качестве удобрений, отнесённых к марке УОСВ-1.

При согласовании ТУ для исследования в РНПЦ гигиены были использованы образцы осадков, обработанные и необработанные ультразвуком после механического обезвоживания (центрифугирования). Результаты испытаний приведены в таблице 2.

Таблица 2. – Содержание металлов (мг/кг) в избыточном активном иле до и после обработки ультразвуком

Наименование металлов	До обработки, мг/кг	После УЗ обработки, мг/кг	Степень извлечения, %
Свинец	28,6	16,5	42
Кадмий	1,65	1,46	12
Никель	67,4	50,6	25
Хром	154	120	22
Цинк	620	358	42
Медь	48,2	39,4	18

Как видно из таблицы 2, ультразвуковая обработка и центрифугирование избыточного активного ила позволяет снизить в нём содержание цинка и меди до значений, соответствующих требованиям ТУ для удобрений марки УОСВ-1. Так, ультразвуковая обработка позволяет регулировать содержание тяжёлых металлов в твёрдой фазе избыточного активного ила. Металлы, перешедшие в жидкую фазу, находятся в составе взвешенных частиц в растворе. При возврате надиловой воды в сточные воды, поступающие на очистку, они частично удаляются в составе сырого осадка, а частично поступают на биологическую очистку. Это происходит, если они не извлекаются из жидкой фазы. При этом содержание тяжёлых металлов в сыром осадке увеличивается на 0,1...0,4%. Следует отметить, что для достижения требуемого эффекта при расходе избыточного активного ила 700 м<sup>3</sup>/сутки и используемой мощности УЗ-излучателей 25 кВт объем камеры обработки должен составлять не менее 0,24 м<sup>3</sup>.

Из жидкой фазы иловой суспензии, обработанной ультразвуком, тяжелые металлы могут быть извлечены с помощью сорбционных материалов. Это обеспечивает извлечение тяжелых металлов из возвратных потоков сточных вод, поступающих на очистные сооружения, и предотвращает превышение их содержания в осадках сточных вод. На рисунках 4 и 5 представлены два варианта использования ультразвуковой обработки для регулирования содержания тяжёлых металлов в избыточном активном иле.

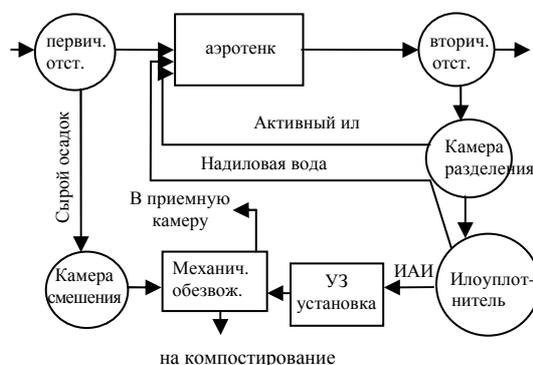


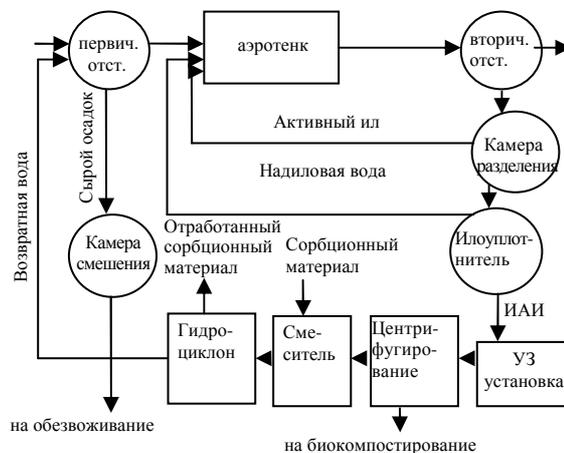
Рисунок 4. – Схема очистки сточных вод с использованием ультразвуковой обработки избыточного активного ила для регулирования содержания тяжелых металлов

Для подготовки осадков к использованию в качестве удобрений разработан технологический регламент, который устанавливает основные требования и условия, соблюдение которых обеспечит безопасное для окружающей среды использование осадков сточных вод, длительное время находящихся на картах иловых площадок очистных сооружений коммунальных сточных вод. Подготовка для использования осадков сточных вод включает ультразвуковую обработку избыточного активного ила (если в осадках превышаются нормы содержания тяжелых металлов) и компостирование.

Для извлечения тяжелых металлов из жидкой фазы сорбент добавляется в обработанный ультразвуком избыточный активный ил с последующим его отделением в гидроциклоне (рисунок 5). Данная схема позволяет интенсифицировать процесс очистки сточных вод и решить проблему утилизации как избыточного активного ила, так и сырого осадка после первичных отстойников.

Идея использования ультразвука для обработки сырого осадка с целью извлечения из нерастворимой части легкоокисляемых органических веществ возникла вследствие получения положительных результатов исследований по ацидофикации сырого осадка, проводимых ООО «АКВАРОС» при непосред-

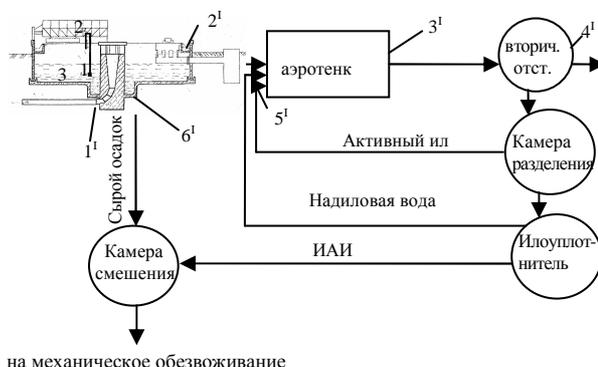
ственном участии академика РАЕН, доктора биологических наук Н.С. Жмур, и лабораторных испытаний, включающих использование обработанного ультразвуком активного ила и сырого осадка. Для определения влияния ультразвуковой обработки сырого осадка на состав осадков и процесс очистки в целом проводились комплексные исследования в условиях УП «Витебскводоканал».



**Рисунок 5. – Схема очистки сточных вод с ультразвуковой обработкой всего избыточного активного ила после илоуплотнителя и сорбционным извлечением тяжелых металлов из фугата**

Исследования по ультразвуковой обработке сырого осадка из первичных отстойников выполнены на установке с гидродинамическим излучателем в производственных условиях. В ходе исследований объектами контроля служили: сточные воды, поступающие в первичный отстойник, осветленные сточные воды, очищенные сточные воды после вторичных отстойников, активный ил в аэротенках, сырой осадок. В ходе исследований контролировали: содержание ХПК<sub>фильтр</sub>, БПК<sub>5</sub>, азота аммонийного, азота нитратов, азота нитритов, фосфора общего; сухой остаток; ЛЖК; влажность; зольность; концентрацию ила; иловой индекс; окислительно-восстановительный потенциал (ОВП); взвешенные вещества. Расход сточных вод, поступающих в отстойник, составлял 840...1380 м<sup>3</sup>/ч.

Сырой осадок из приемка первичного отстойника забирается насосом и подается после ультразвуковой обработки в сточную воду того же первичного отстойника 6 раз в сутки продолжительностью по два часа. Отгрузка избыточного осадка осуществляется один раз через 2...4 суток. Периодичность отгрузки зависит от концентрации и объема осадка, накопившегося в приемке отстойника. Осадок из приемка удаляется не полностью (75...80% от накопившегося), что обеспечивает сохранение части анаэробного ила в первичном отстойнике, адаптированного к воздействию токсикантов. Важным условием, которое необходимо соблюдать в первичных отстойниках, служит предотвращение насыщения сточных вод кислородом. Для выполнения этого условия сырой осадок по трубопроводу от ультразвуковой установки подается непосредственно в осветленную воду на определенную глубину, при этом содержание кислорода в осадках не должно превышать 0,5...0,7 мг/дм<sup>3</sup>, что позволяет поддерживать анакисный процесс. Технологическая схема ультразвуковой установки первичного отстойника показана на рисунке 6.



**1 – насос; 2 – уз. установка; 3 – зона осаждения осадка**

**Рисунок 6. – Схема очистки сточных вод с ультразвуковой обработкой сырого осадка в первичном отстойнике**

Ультразвуковая установка с гидродинамическим излучателем смонтирована на вращающейся ферме илоскреба радиального первичного отстойника с погружным насосом ( $Q - 0,3 \dots 5,6$  л/с;  $H - 9,7$  м;  $P - 0,55$  кВт). Забор осадка производится на глубине 3 м. Точки отбора проб (см. рисунок 6): 1<sup>1</sup> – поступающая сточная вода; 2<sup>1</sup> – осветленная сточная вода; 3<sup>1</sup> – иловая суспензия после аэротенка; 4<sup>1</sup> – сточная вода после вторичного отстойника; 5<sup>1</sup> – циркулирующий активный ил; 6<sup>1</sup> – сырой осадок. Установку включают в работу во время движения илоскреба. Объем накопившегося осадка составляет 80 м<sup>3</sup>/сутки; гидравлическая глубина отстойника – 3,395 м; объем – 2398,6 м<sup>3</sup>. Время пребывания воды в отстойнике – 1,5...2,8 часа.

Предложенный способ обработки сырого осадка применяется на УП «Витебскводоканал» с 2015 года. Результаты средних значений проведенных испытаний с ультразвуковой обработкой сырого осадка приведены в таблицах 3–9.

Таблица 3. – Сравнительная характеристика основных показателей сырого осадка исходного и с ультразвуковой обработкой

Объект испытаний	ХПК, мг О <sub>2</sub> /дм <sup>3</sup>	БПК <sub>5</sub> , мг О <sub>2</sub> /дм <sup>3</sup>	ЛЖК, мг/дм <sup>3</sup>	Сухой остаток, мг/дм <sup>3</sup>	Концентрация, г/дм <sup>3</sup>	Влажность, %	Зольность, %
Сырой осадок	1134	735	366	1220	32,2	96,8	23,8
Сырой осадок с УЗО	3929	1860	686	2480	42,4	95,5	28,0

Таблица 4. – Сравнительная характеристика основных показателей осветленных сточных вод с ультразвуковой обработкой сырого осадка и без обработки

Объект испытаний	ХПК, мг О <sub>2</sub> /дм <sup>3</sup>	БПК <sub>5</sub> , мг О <sub>2</sub> /дм <sup>3</sup>	ЛЖК, мг/дм <sup>3</sup>	Сухой остаток, мг/дм <sup>3</sup>	Азот аммонийный, мг/дм <sup>3</sup>	Фосфор общий, мг/дм <sup>3</sup>	Взвешенные вещества, мг/дм <sup>3</sup>
Сточная вода исходная	478	265	140	826	44,4	4,9	326
Осветленная сточная вода с УЗО	849	512	342	1450	48,1	4,7	200
Осветленная сточная вода в обычном режиме	411	236	146	796	43,8	4,8	210

Таблица 5. – Сравнительная характеристика основных показателей работы аэротенков в обычном режиме и с добавлением осветленных вод с ультразвуковой обработкой сырого осадка

Объект испытаний	ХПК, мг О <sub>2</sub> /дм <sup>3</sup>	БПК <sub>5</sub> , мг О <sub>2</sub> /дм <sup>3</sup>	ЛЖК, мг/дм <sup>3</sup>	Азот аммонийный, мг/дм <sup>3</sup>	Фосфор общий, мг/дм <sup>3</sup>	Азот нитритный, мг/дм <sup>3</sup>	Азот нитратный, мг/дм <sup>3</sup>
Аэротенк в обычном режиме	48	15	11,4	6,2	3,9	0,202	1,6
Аэротенк с УЗ обработкой	46	12	11,1	4,3	4,1	0,760	6,8

Таблица 6. – Сравнительная характеристика основных показателей работы вторичных отстойников в обычном режиме и с ультразвуковой обработкой сырого осадка

Объект испытаний	ХПК, мг О <sub>2</sub> /дм <sup>3</sup>	БПК <sub>5</sub> , мг О <sub>2</sub> /дм <sup>3</sup>	Азот аммонийный, мг/дм <sup>3</sup>	Фосфор общий, мг/дм <sup>3</sup>	Азот нитритный, мг/дм <sup>3</sup>	Азот нитратный, мг/дм <sup>3</sup>	Взвешенные вещества, мг/дм <sup>3</sup>
Вторичный отстойник в обычном режиме	46	12	5,2	2,6	0,360	2,6	22,8
Вторичный отстойник с УЗ обработкой	33	8,4	3,2	2,3	0,280	1,9	16,2

Таблица 7. – Сравнительная характеристика извлечения из сырого осадка ЛЖК и легкоокисляемых органических веществ с ультразвуковой обработкой и без обработки

Дата испытаний	ЛЖК, мг/дм <sup>3</sup>		ХПК фильтр, мг О <sub>2</sub> /дм <sup>3</sup>		Сухой остаток, мг/дм <sup>3</sup>	
	с УЗО	без обработки	с УЗО	без обработки	с УЗО	без обработки
15.02.18	278	278	1138	1138	1161	1161
18.02.18	494	386	1910	1428	1460	1435
19.02.18	689	432	2260	1740	1508	1500
20.02.18	1054	454	2586	1864	1540	1440
21.02.18	1104	480	2565	1918	1620	1432
22.02.18	986	454	2650	1896	1820	1418
23.02.18	882	446	2542	1868	1710	1364
26.02.18	812	437	2592	1848	1760	1364
27.02.18	796	430	2548	1824	1750	1337

Таблица 8. – Прослеживаемость изменения ОВП в процессе очистки сточных вод в обычном режиме и с ультразвуковой обработкой сырого осадка

Объект испытаний	Окислительно-восстановительный потенциал (ОВП), мВ					
	в обычном режиме			с УЗО сырого осадка		
	min	max	среднее	min	max	среднее
Поступающие сточные воды в первичный отстойник	-133	-143	-138	-	-	-
Осветленные сточные воды после первичного отстойника	-132	-198	-165	-212	-228	-220
Поступающие сточные воды в аэротенк	-132	-176	-154	-202	-218	-210
Очищенные сточные воды после аэротенков	+75	+97	+86	+70	+150	+110
Очищенные сточные воды после вторичного отстойника	+100	+120	+110	+150	+210	+180

Результаты проведенных испытаний с ультразвуковой обработкой сырого осадка, способствующей извлечению растворимых легкоокисляемых органических веществ, показали увеличение окислительной способности активного ила, что привело к интенсификации процессов нитрификации и денитрификации, повышению эффективности удаления биогенных элементов: азота аммонийного с 87 до 92%; БПК<sub>5</sub> с 95 до 97%; ХПК с 90 до 96%; фосфора общего с 55 до 58, а также к повышению эффективности извлечения взвешенных веществ с 92 до 95%. Для более глубокого удаления фосфора необходимо предусмотреть аноксидную зону в аэротенках, оснастив ее тихходными мешалками.

Легкоокисляемые органические вещества способствуют накоплению биомассы флокулообразующих микроорганизмов, формирующих седиментационные и защитные свойства активного ила. Седиментационные характеристики активного ила в обычном режиме и после ультразвуковой обработки приведены в таблице 9.

Таблица 9. – Седиментационные характеристики активного ила в обычном режиме и с УЗ-обработкой сырого осадка

Время осаждения, t, мин	V = 1000 мл исходной иловой смеси	V = 1000 мл иловой суспензии с УЗ-обработкой
0	1000	1000
5	850	780
10	710	620
15	570	440
20	490	340
25	450	320
30	390	308
C ила = 2,8 г/дм <sup>3</sup>		
Иловой индекс	139	110

Как видно из таблицы 9, наблюдается снижение илового индекса при добавлении растворимых легкоокисляемых веществ, поступающих с осветленными водами из первичного отстойника в процессе ультразвуковой обработки сырого осадка, на 21%.

Основываясь на результатах проведенных исследований обработанного ультразвуком сырого осадка первичных отстойников в анаэробных условиях, можно сделать вывод, что ультразвуковая обработка сырого осадка в первичных отстойниках позволяет извлечь растворимые легкоокисляемые органические вещества, которые способствуют образованию полимерного геля, улучшающего седиментационные и окислительные характеристики активного ила, обеспечивая тем самым интенсификацию технологических процессов биологической очистки сточных вод. Процесс анаэробного сбразивания сырого осадка в первичных отстойниках в сочетании с УЗ-обработкой улучшает свойства осадка. Сырой осадок после ультразвуковой обработки, претерпевший ферментацию, быстрее приобретает функции первичного анаэробного ила с более высокой концентрацией и меньшей влажностью.

**Заключение.** Применительно к очистным сооружениям канализации определены условия ультразвуковой обработки, обеспечивающие повышение эффективности механической очистки. Для очистных сооружений производительностью 70 тыс. м<sup>3</sup>/сутки объем активного ила, обрабатываемого ультразвуком, составил 700 м<sup>3</sup> при суммарной мощности излучателя 25,2 кВт.

Повышение ферментативной активности биомассы в условиях очистных сооружений обеспечивается обработкой до 10% циркулирующего активного ила продолжительностью один час в течение каждых трех часов.

Ультразвуковая обработка и последующее центрифугирование активного ила способствует снижению концентрации тяжелых металлов в кеке до показателей, позволяющих использовать его для получения удобрений и/или почвоулучшающей добавки.

Обработка сырого осадка, накапливаемого в первичном отстойнике с использованием установки циркуляционного типа с гидродинамическим излучателем, обеспечивает значительное увеличение содержания летучих жирных кислот и легкоокисляемой органики, что позволяет повысить степень очистки сточных вод по комплексу показателей: азота аммонийного с 87 до 92%; БПК<sub>5</sub> с 95 до 97%; ХПК с 90 до 96%; фосфора общего с 55 до 58%; взвешенных веществ с 92 до 95%.

В процессе анаэробного сбраживания сырого осадка в первичных отстойниках в сочетании с ультразвуковой обработкой улучшаются свойства осадка по показателям: массовая доля влаги снизилась с 98 до 96%; органических веществ – с 78 до 67...76%, что приводит к уплотнению и повышению концентрации осадка в 2...4 раза.

В результате экспериментальных исследований установлено, что ультразвуковая обработка активного ила и сырого осадка способствует:

- повышению флокулирующих свойств активного ила и влагоотдающих свойств сырого осадка;
- регулированию в определенных пределах содержания тяжелых металлов в избыточном активном иле и сыром осадке;
- повышению ферментативной активности биомассы ила;
- ускорению процесса накопления летучих жирных кислот и легкоокисляемой органики в процессе анаэробного сбраживания сырого осадка в первичном отстойнике усиленного ультразвуковой обработкой.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Гигиенические требования к использованию сточных вод и их осадков для орошения и удобрения : СанПиН 2.17.573-96.
2. Охрана природы. Почвы. Требования к свойствам осадков сточных вод при использовании их в качестве удобрений : ГОСТ Р 17.4.3.07.
3. О требованиях в области охраны окружающей среды при размещении и эксплуатации объектов, осуществляющих сортировку и переработку коммунальных отходов : постановление М-ва природных ресурсов и охраны окружающей среды Респ. Беларусь и М-ва жилищно-коммунального хозяйства Респ. Беларусь от 20 дек. 2004 г. № 38/37.
4. Гигиеническая оценка качества почвы населенных мест : Методические указания МУ 2.1.7.730-99 : утв. Главным государственным санитарным врачом Рос. Федерации 7 февр. 1999 г.
5. Санитарно-эпидемиологические требования к качеству почвы : СанПиН 2.1.7.1287-03 : утв. Главным государственным санитарным врачом Рос. Федерации 16 апр. 2003 г. – Введ. 15.06.2003 ; с изм. и доп. на 25 апр. 2007 г.
6. Методические указания по определению тяжелых металлов в почвах сельхозугодий и продуктов растениеводства. – М. : ЦИНАО, 1989. – 61с.
7. Экспресс-методы санитарно-паразитологического исследования объектов окружающей среды : Инструкция по применению : утв. заместителем министра здравоохранения, главным санитарным врачом Респ. Беларусь М.И. Римжа от 13.06.2005. – Регистр. № 65-0605.

Поступила 22.02.2019

#### USING ULTRASOUND TREATMENT TO INTENSIFY AND IMPROVE THE EFFICIENCY OF BIOLOGICAL CLEANING OF WASTE WATER AND IMPROVE THE PROPERTIES OF RAW SUCTION

*I. GOLOVNEV, V. MARZUL*

*The results of modeling of sewage treatment plants are presented, which make it possible to predict changes in the qualitative and quantitative composition of precipitation when using activated sludge for ultrasound to precipitate suspended solids in primary sedimentation tanks, as well as to extract heavy metals from excess activated sludge. The results of industrial tests of the developed technology of optimal treatment with ultrasound of activated sludge and wet sludge in the process of biological wastewater treatment are analyzed. When using methods for treating activated sludge and wet sludge with ultrasound, certain conditions must be met. In most cases, it is advisable to carry out ultrasonic processing using a hydrodynamic emitter, which allows you to more accurately dose energy costs and processing time to achieve the desired result.*

**Keywords:** *excess activated sludge, sludge water, wastewater treatment.*

УДК 674.04:678

## АНАЛИЗ СВОЙСТВ ДРЕВЕСНО-ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ С РАЗЛИЧНЫМИ НАПОЛНИТЕЛЯМИ И СВЯЗУЮЩИМ СОПОЛИМЕРОМ АКРИЛОНИТРИЛА И ВИНИЛХЛОРИДА

*канд. хим. наук, доц. С.Ф. ЯКУБОВСКИЙ;  
канд. техн. наук, доц. Ю.А. БУЛАВКА, Т.И. ЛЕБЕДЕВА  
(Полоцкий государственный университет)*

*Исследуется возможность использования природных целлюлозо- и лигнинсодержащих отходов (костры льна, лигнина гидролизного, коры сосновой) в качестве альтернативы древесного наполнителя при производстве плитных материалов со связующим сополимером акрилонитрила и винилхлорида. Для подтверждения возможности вовлечения целлюлозо- и лигнинсодержащих отходов в производство древесно-полимерных композитов проведены экспериментальные доказательства по таким показателям, как твердость по Бринеллю, прочность композитов при статическом изгибе, плотность, гигроскопичность (набухание) и водопоглощение, в сравнении с плитным материалом с наполнителем из опилок хвойных пород и едиными для всех связующим сополимером акрилонитрила и винилхлорида производства завода «Полимир» ОАО «Нафтан». Приведенные результаты, показали потенциальную возможность утилизации рассматриваемых отходов растениеводства и деревообработки путем использования их в производстве древесно-полимерных композитов.*

**Ключевые слова:** *древесно-полимерный композит, целлюлозо- и лигнинсодержащие отходы, костра льна, лигнин, кора сосновая, сополимер акрилонитрила и винилхлорида.*

**Введение.** В целом по Республике Беларусь общий объем заготовки древесины оценивается на уровне 19 млн кубометров в год, при этом ощущается её нехватка в производстве изделий мебели и строительных материалов [1]. В настоящее время в промышленное производство все больше вовлекается сосна, являющаяся основной лесообразующей породой Республика Беларусь, поскольку занимает более половины всей площади лесов. С древесиной из леса ежегодно вывозится около 2 млн кубометров отходов древесной биомассы, значительную часть которых составляет кора. Следует отметить, что отходы окорки древесины только в незначительных количествах используются на сжигание и в сельском хозяйстве. Основную же их массу вывозят в отвалы, что сопровождается загрязнением водного бассейна балластными (экстрактивными) веществами коры, а также продуктами, образующимися при её разложении. Кроме того, при хранении на открытой площадке в отвалах данных отходов они представляют существенную пожарную опасность для близлежащих строений и лесных массивов [2; 3]. Помимо этого, на сельскохозяйственных предприятиях республики скапливаются тысячи тонн непродуктивных отходов, от переработки злаковых культур, льнокостры, трав, которые также засоряют окружающую среду и ухудшают экологическую обстановку. В Беларуси до сих пор остается нерешенной проблема рационального использования гидролизного лигнина, побочного продукта (негидролизуемого остатка) производства, образующегося при завершении процесса гидролитического разложения (варки) в основном хвойного древесного сырья в гидролизаторах в присутствии слабого раствора серной кислоты. По данным [4], объекты хранения гидролизного лигнина в Республике Беларусь содержат от 4 до 7 млн тонн данного отхода, длительное хранение которого в отвалах приводит к эрозии почвы, гибели растительности, загрязнению грунтовых вод, отравлению газовыми выделениями воздушного бассейна при возгорании [5].

В таблице 1 представлена доля отходов сельского хозяйства, лесного и рыбного хозяйства в общей структуре образования отходов производства в Республике Беларусь.

Таблица 1. – Динамика образования отходов в Республике Беларусь в период с 2012 по 2018 год

Вид деятельности	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Образовано отходов производства, всего тыс. тонн	40 847	40 305	52 529	49 865	49 448	55 506	60 723
в том числе:							
Сельское, лесное и рыбное хозяйство, тыс. тонн	236,6	212,0	248,3	414,0	563,9	621,0	698,9

*Источник:* данные Белстата.

Из таблицы видно, что количество образующихся отходов производства ежегодно растет как в целом по всем видам экономической деятельности, так и по сельскому хозяйству, лесному и рыбному хозяйству, что требует разработки эффективных способов их утилизации и рециклинга.

Разработка безотходных технологий, более комплексное использование природных ресурсов выступает приоритетным направлением решения ряда экологических проблем. Поиск альтернативных путей рационального использования целлюлозо- и лигнинсодержащих отходов, в настоящее время подлежащих захоронению либо сжиганию, позволит увязать ликвидацию целлюлозо- и лигнинсодержащих отходов с природоохранной деятельностью и получить экономический эффект. В частности, их вовлечение в производство древесно-полимерных композитов позволит сократить использование и (или) заменить натуральную древесину и снизить нагрузку на окружающую среду.

**Методы исследований.** Древесно-полимерные композиты состоят из двух или более взаимно нерастворимых фаз, содержащих древесину как армирующий наполнитель [6–9]. В данной работе исследуется возможность использования в качестве наполнителя сосновую кору хвойных пород, льняную костру и гидролизный лигнин; в качестве полимерного связующего – сополимер акрилонитрила и винилхлорида производства завода «Полимир» ОАО «Нафтан», содержащий 48% акрилонитрила, 51% винилхлорида и 1% аллилсульфоната [10; 11]. Образцы древесно-полимерных композитов получали методом горячего прессования порошкообразной сухой смеси связующего и наполнителя (использовалась фракция до 2 мм). Прессование производилось при температуре 150 °С и давлении 10 МПа. Содержание сополимера акрилонитрила и винилхлорида составляло 10% масс.

В качестве показателей, характеризующих физико-химические свойства плитного материала, выбраны твердость по Бринеллю по [12; 13]; плотность композитов определяли взвешиванием образца с точностью до 0,01 г по ГОСТ 10634; прочность композитов при статическом изгибе определяли на приборе, имеющем приспособление для измерения стрелы прогиба и позволяющем измерять величину нагрузки с точностью до 1% от величины измеряемой силы по ГОСТ 10635; гигроскопичность (набухание) определяли взвешиванием образца после его выдерживания в среде с 97%-ной относительной влажностью по ГОСТ 10634; водопоглощение определяли взвешиванием образца после 24 ч пребывания в дистиллированной воде по ГОСТ 10634.

**Результаты и их обсуждение.** Результаты определения физико-химических свойств древесно-полимерных композитов в сравнении с промышленными аналогами представлены в таблице 2.

Таблица 2. – Физико-химические свойства древесно-полимерных композитов, содержащих целлюлозо- и лигнинсодержащие отходы

Образец, содержание наполнителя	Значения показателей физико-химических свойств древесно-полимерных композитов				
	твердость по Бринеллю, МПа	прочность на изгиб, МПа	водопоглощение, % масс.	гигроскопичность (набухание), % масс.	Плотность, кг/м <sup>3</sup>
<i>Льняная костра соломенной с сополимером акрилонитрила и винилхлорида</i>					
10% масс.	120,0	12,89	22,1	1,37	1282
<i>Льняная костра молотая с сополимером акрилонитрила и винилхлорида</i>					
10% масс.	135,8	–	21,4	2,9	1044
<i>Кора сосновая с сополимером акрилонитрила и винилхлорида</i>					
10% масс.	99,5	–	10	0,8	1320
<i>Лигнин с сополимером акрилонитрила и винилхлорида</i>					
10% масс.	145,3	4,993	21,7	2,72	1218
<i>Опилки хвойных пород с сополимером акрилонитрила и винилхлорида</i>					
10% масс.	130,2	14,1	20,1	2,2	1320
<i>Древесноволокнистая плита по ГОСТ 4598</i>					
Марка НТ	–	15	13	3...12	не менее 600
<i>Плиты древесно-стружечные по ГОСТ 10632</i>					
Марка ПА	–	18	12...22	до 5	550...820
Марка ПБ	–	16	15...33	до 12	550...820

Из таблицы 2 видно, что древесно-полимерные композиты, содержащие в качестве наполнителя целлюлозо- и лигнинсодержащие отходы (льняную костру как соломенной, так и молотую; лигнин гидролизный), по показателям прочности, твердости, плотности, водопоглощению и гигроскопичности приближаются к аналогичным из опилок хвойных пород при использовании в качестве связующего сополимера акрилонитрила и винилхлорида и по ряду показателей промышленных аналогов (древесноволокнистым и древесно-стружечным плитам). По такому показателю, как гигроскопичность (набухание), образцы с льняной соломенной и корой сосны превосходят опилки хвойных пород.

**Заключение.** В результате проведенного исследования технически обосновано, что по ряду физико-химических свойств экологически целесообразна утилизация целлюлозо- и лигнинсодержащих отходов (костры льна, лигнина гидролизного, коры сосновой) в качестве наполнителя с экологически безопас-

ным связующим (в том числе сополимером акрилонитрила и винилхлорида) при производстве древесно-полимерных композитов, широко используемых в промышленном и гражданском строительстве, производстве мебели и других областях.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Декорирование элементов мебели и столярно-строительных изделий методом тиснения текстуры древесины и имитацией резьбы / А.А. Барташевич [и др.] // Труды БГТУ. Серия 1 : Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов. – 2018. – № 2 (210). – С. 197–203.
2. Особенности микроструктуры отходов сухой окорки сосны как сырья для получения нефтяных сорбентов / С.Ф. Якубовский [и др.] // Вестн. Полоцкого гос. ун-та. Сер. В, Прикладные науки. – 2011. – № 11. – С. 154–157.
3. Богомолов, Б.Д. Химия древесины и основы химии высокомолекулярных соединений / Б.Д. Богомолов. – М. : Лесная промышленность, 1973. – 400 с.
4. Плышевский, С.В. Экологические и технологические аспекты утилизации гидролизного лигнина в Республике Беларусь [Электронный ресурс] / С.В. Плышевский, А.Л. Ковш // Экология на предприятии. – 2017. – № 3 (69). – март. – Режим доступа: [https://ecologia.by/number/2017/3/Ekologicheskie\\_i\\_tehnologicheskie\\_aspekty\\_utilizatsii\\_gidroliznogo\\_lignina\\_v\\_Respublike\\_Belarus/](https://ecologia.by/number/2017/3/Ekologicheskie_i_tehnologicheskie_aspekty_utilizatsii_gidroliznogo_lignina_v_Respublike_Belarus/)
5. Эколого-гигиенические аспекты использования гидролизного лигнина в агроценозах на Севере / Н.И. Романчук [и др.] // Профилактическая и клиническая медицина. – 2007. – № 3. – С. 67–70.
6. Плотникова, Г.П. Повышение эффективности изготовления древесно-композитных материалов конструкционного назначения / Г.П. Плотникова, С.Х. Симонян // Системы. Методы. Технологии. – 2017. – № 3 (35). – С. 131–137.
7. Древесно-полимерные композиты – эффективные отделочные строительные материалы / В.А. Ушков [и др.] // Промышленное и гражданское строительство. – 2014. – № 8. – С. 82–85.
8. Ponomarev, A.N. Hybrid wood-polymer composites in civil engineering / A.N. Ponomarev, A.S. Rassokhin // Инженерно-строительный журнал. – 2016. – № 8 (68). – С. 45–57.
9. Клесов, А.А. Древесно-полимерные композиты / А.А. Клесов. – СПб. : НОТ, 2010. – 353 с.
10. Состав для изготовления плитного материала : пат. ВУ № 6643 / С.М. Ткачев, С.В. Покровская, С.И. Хорошко, С.Ф. Якубовский. – Опубл. 2004.07.15.
11. Свойства древесно-полимерных композитов, полученных из порошкообразного сополимера и древесных опилок / С.Ф. Якубовский, С.И. Хорошко // Вестн. Полоцкого гос. ун-та. Серия, В. Прикладные науки. Промышленность. – 2014. – № 3. – С. 106–109.
12. Григорьев, А.П. Лабораторный практикум по технологии поликонденсационных пластических масс / А.П. Григорьев, О.Я. Федотова. – М. : Высш. шк., 1971. – 250 с.
13. Соловьева, Т.В. Технология древесно-волокнистых плит, технология древесно-стружечных плит, технология композиционных материалов и пластиков / Т.В. Соловьева, А.А. Пенкин. – Минск : БГТУ, 2009. – 144 с.

Поступила 07.02.2019

## ANALYSIS OF PROPERTIES OF WOOD-POLYMER COMPOSITES WITH VARIOUS FILLERS AND A BINDING CO-POLYMER OF ACRYLONITRILE AND VINYL CHLORIDE

S. YAKUBOUSKI, YU. BULAUKA, T. LEBEDZEVA

*The possibility of using natural cellulose- and lignin-containing wastes (flax shives, hydrolysed lignin, pine bark) as an alternative to wood filler in production of plate materials with a binder copolymer of acrylonitrile and vinyl chloride has been studied. To confirm the possibility of involving cellulose- and lignin-containing wastes in the production of wood-polymer composites, experimental evidence were carried out on such indicators as Brinell hardness, strength of the composites under static bending, density, hygroscopicity (swelling) and water absorption in comparison with plate material filled with coniferous sawdust and a common binder copolymer of acrylonitrile and vinyl chloride produced by the Polymir plant of Naftan OJSC. The presented results illustrate the potential possibility of utilizing cellulose and lignin-containing wastes covered by this research by using them in the production of wood-polymer composites.*

**Keywords:** wood-polymer composite, cellulose and lignin-containing waste, flax shives, lignin, pine bark, acrylonitrile-vinyl chloride copolymer.

## СОДЕРЖАНИЕ

### МАШИНОВЕДЕНИЕ И МАШИНОСТРОЕНИЕ

<i>Голембиевский А.И.</i> Функциональное проектирование в познании станочного оборудования с числовым программным управлением .....	2
<i>Асламов Ю.П., Давыдов И.Г.</i> Границы применимости алгоритма разреженной декомпозиции сигналов вибрации по избыточному вейвлетному словарю .....	11
<i>Попок Н.Н.</i> Методология исследования процесса резания материалов в современных условиях развития машиностроения .....	21
<i>Кутузов В.В., Моргалик Б.М., Колюкович Е.А.</i> Целесообразность эксплуатации объектов с применением технико-экономического моделирования .....	31
<i>Аземша С.А., Грищенко Т.В., Ясинская О.О.</i> Оценка существенности изменения показателей аварийности .....	36
<i>Попок Н.Н., Герасимов А.А., Тихон Е.М.</i> Повышение точности блочно-модульных расточных режущих инструментов .....	41

### МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

<i>Астрашаб Е.В., Григорчик А.Н., Кукареко В.А., Белоцерковский М.А., Сосновский А.В.</i> Влияние времени ионно-плазменного азотирования в водородсодержащей среде на триботехнические свойства газотермических покрытий из проволочных высокохромистых сталей .....	49
<i>Рубаник В.В.</i> Ускорение синтеза функциональных слоистых двойных гидроксидов при ультразвуковом воздействии .....	55
<i>Ланин В.Л., Грищенко Ю.Н., Хацкевич А.Д.</i> Краевой эффект индукционного нагрева деталей в воздушном зазоре магнитопровода .....	60
<i>Леванцевич М.А., Пилипчук Е.В., Калач В.Н., Дудан А.В.</i> Особенности фрикционного взаимодействия хромовых покрытий с резиновым контртелом в условиях граничного трения .....	65
<i>Якубовская С.В., Бабич В.Е.</i> Спекание ферромагнитных композиционных материалов на основе карбидов бора и кремния .....	72
<i>Жорник В.И.</i> Композиционные материалы с бимодальной структурой на основе микро- и нанопорошков алмаза .....	78
<i>Белоцерковский М.А.</i> Аналитическая оценка необходимых параметров газопламенной струи при напылении полимерных покрытий .....	86
<i>Кукареко В.А., Кушнеров А.В., Комаров Ф.Ф., Константинов С.В., Стрельницкий В.Е.</i> Структурно-фазовое состояние и адгезионная прочность покрытий CrN и TiCrN, сформированных методом вакуумно-дугового осаждения .....	93
<i>Короткевич С.Г., Ковтун В.А.</i> Эксплуатационная надёжность цистерн пожарных автомобилей: модернизация стальных конструкций в целях повышения их механических характеристик .....	97
<i>Фруцкий В.А., Пилипенко С.В.</i> Альтернативные материалы для ремонта роторной группы насос-моторов .....	102
<i>Турищев Л.С.</i> О влиянии разномодульности материала на собственные частоты балок .....	107

### ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

<i>Ермак А.А., Гришин П.Ф., Артеменок Н.А.</i> Перспективы применения активированной глины для доочистки остаточного продукта процесса «юникрекинг» .....	111
<i>Зильберглейт М.А., Шевчук М.О., Нестерова С.В., Якубовский С.Ф.</i> Антимикробные свойства катионных полиэлектролитов .....	118
<i>Кожмятов К.Ю., Булавка Ю.А.</i> Направления повышения промышленной безопасности оборудования, работающего под избыточным давлением на нефтеперерабатывающем предприятии .....	125
<i>Головнев И.Э., Марицль В.Н.</i> Использование ультразвуковой обработки для интенсификации и повышения эффективности биологической очистки сточных вод и улучшения свойств сырого осадка .....	129
<i>Якубовский С.Ф., Булавка Ю.А., Лебедева Т.И.</i> Анализ свойств древесно-полимерных композитов с различными наполнителями и связующим сополимером акрилонитрила и винилхлорида .....	137