

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.

---

---

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 27.02.2018. Бумага офсетная 70 г/м<sup>2</sup>. Формат 60×84<sup>1</sup>/<sub>8</sub>. Ризография.  
Усл. печ. л. 14,72. Уч.-изд. л. 17,38. Тираж 100 экз. Заказ 603.

## МАШИНОВЕДЕНИЕ И МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 621.9.06+372.8

### ЭВОЛЮЦИЯ РАЗВИТИЯ КИНЕМАТИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ СТАНКОВ ДЛЯ ЗУБОТОЧЕНИЯ ОБКАТНЫМ РЕЗЦОМ ТИПА ДОЛБЯКА

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

*Рассматривается целенаправленная эволюция развития металлорежущих станков для обработки цилиндрических зубчатых колес обкатным резцом типа зуборезного долбяка: металлорежущий станок для зуботочения как объединение кинематических групп различного функционального назначения. Показана определяющая роль групп формообразования в формировании кинематической структуры металлорежущих станков: простые и сложные формообразующие группы, сложные гибридные механико-гидравлические и мехатронные формообразующие группы. Рассмотрены механико-гидравлическая и мехатронная структурные схемы станка для зуботочения обкатным резцом типа долбяка цилиндрических зубчатых колес. Выполнен кинематический анализ особенностей настройки.*

**Ключевые слова:** зуботочение обкатным резцом, металлорежущие станки для зуботочения цилиндрических колес, формообразующие группы, гибридные механико-гидравлические и мехатронные группы, кинематический анализ, настройка.

**Введение.** В работе [1] показано, что определяющую роль в формировании кинематической структуры металлорежущих станков играют группы формообразования, воспроизводящие образующую и направляющую реальных поверхностей. Многообразие формообразующих групп в современных металлорежущих станках разделено на два вида. *Первый вид* составляют простые, или элементарные, формообразующие группы, воспроизводящие простое вращательное или поступательное формообразующее движение. В таких группах траектория формообразующего движения не настраивается, а ее вид задается непосредственно соответствующей кинематической парой исполнительного органа, воспроизводящего простое движение. По существу, кинематическая пара исполнительного органа – это внутренняя связь простой группы. *Второй вид* – сложные формообразующие группы, воспроизводящие станочное зацепление, имитирующее более сложный механизм, например передачу винт-гайка, зубчатую, червячную, зубчато-реечную. В таких группах траектория сложного формообразующего движения настраивается расположенным во внутренней связи группы соответствующим органом настройки, задающим жесткую функциональную связь между исполнительными органами группы. В сложных формообразующих группах, состоящих только из механических передач, в качестве органа настройки используются, как правило, гитары сменных зубчатых колес, передаточное отношение которых определяют с точностью до 5...7 знаков после запятой.

В работе [2] рассмотрен способ зуботочения цилиндрических зубчатых колес обкатным резцом типа зуборезного долбяка. Класс образования зубчатой поверхности обкат + след. При этом прямозубые колеса необходимо нарезать обязательно косозубым инструментом, так как только в этом случае угол скрещивания осей нарезаемого колеса и инструмента не будет равен нулю. Косозубые колеса можно нарезать как прямозубым, так и косозубым инструментом. При названных условиях скорость резания определяется относительным скольжением боковых поверхностей зубьев и зависит от суммы углов подъема зубьев инструмента, зубьев нарезаемого колеса и угла скрещивания осей инструмента и нарезаемой заготовки. По библиографическим источникам наивыгоднейшая сумма этих углов составляет 90 градусов. При этом угол скрещивания осей обычно принимают равным 60 градусам. Синергизм зуботочения – повышение производительности в 3...5 раз по сравнению с обкатным зубодолблением и зубофрезерованием червячными фрезами.

На рисунке 1 приведена типовая структурная схема станка, реализующая способ зуботочения цилиндрических зубчатых колес обкатным резцом типа зуборезного долбяка. Схема содержит две сложные формообразующие группы  $\Phi_v(B_1B_2)$  и  $\Phi_s(P_3B_4)$  с общим электродвигателем  $M_1$  и группу  $B_c$  ( $P_5$ ) для установочных перемещений суппорта при наладке станка. Кинематическая формообразующая группа  $\Phi_v(B_1B_2)$  воспроизводит профиль (образующую) зубьев нарезаемого колеса, а группа  $\Phi_s(P_3B_4)$ , воспроизводящую линию зуба (направляющую) этого колеса.

Группа  $\Phi_v(B_1B_2)$ , воспроизводящая профиль (образующую) зубьев нарезаемого колеса, создает сложное, двухэлементарное, замкнутое движение обката (станочное зацепление). Ее внутренняя связь – кинематическая цепь, состоящая из механических передач, имеет вид:

$$B_1 \rightarrow \text{шпиндель } 1 \text{ с режущим инструментом } 2 \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow i_x \rightarrow 5 \rightarrow \text{дифференциал} \rightarrow \\ \rightarrow 6 \rightarrow 7 \rightarrow 8 \rightarrow \text{шпиндель с заготовкой обрабатываемого колеса } 9 \rightarrow B_2.$$



Орган настройки  $i_y$ . Расчетная цепь совпадает с внутренней связью группы  $\Phi_s$ . Следовательно, РП имитируют передачу винт-гайка:

$T$  мм перемещения суппорта инструмента ( $\Pi_3$ )  $\rightarrow$  1 оборот заготовки нарезаемого колеса ( $B_4$ ).

УКЦ:

$$1 = T / t_{TB} \cdot i_y \cdot c_2 \cdot i_\Sigma,$$

где  $T = \pi m z_u / \sin \beta$ ;  $T$  – шаг винтовой линии нарезаемого колеса и инструмента;  $\beta$  – угол подъема винтовой линии;  $c_2$  – произведение передаточных отношений постоянных передач расчетной цепи;  $i_\Sigma$  – передаточное отношение дифференциала при одном остановленном входе.

ФН:

$$i_y = t_{TB} / T c_2 \cdot i_\Sigma.$$

Орган настройки  $i_v$ . Скорость воспроизведения образующей задается посредством скорости резания. Поэтому расчетная цепь – это кинематическая связь:

электродвигатель  $M_1 \rightarrow$  шпиндель 1 обкатного резца 2.

Следовательно, РП:

$$n_{M \text{ мин}}^{-1} \text{ электродвигателя } M_1 \rightarrow n_u \text{ мин}^{-1} \text{ обкатного резца 2 (} B_1 \text{)}.$$

УКЦ:

$$n_u = n_M \cdot c_3 \cdot i_v.$$

ФН:

$$i_v = n_u / c_3 \cdot n_M,$$

где  $c_3$  – произведение передаточных отношений постоянных передач расчетной цепи.

Орган настройки  $i_s$ . При использовании общего электродвигателя в формообразующих группах скорость воспроизведения направляющей задается посредством оборотной подачи инструмента. Поэтому расчетная цепь – это кинематическая связь:

шпиндель заготовки 9 суппорт шпинделя обкатного резца 2.

Следовательно, РП:

$$1 \text{ оборот заготовки 9 обрабатываемого колеса } \rightarrow s \text{ мм / об обкатного резца 2 (} \Pi_3 \text{)}.$$

УКЦ:

$$s = 1 \cdot c_4 \cdot i_s.$$

ФН:

$$i_s = s / c_4,$$

где  $c_4$  – произведение передаточных отношений постоянных передач расчетной цепи.

Рассмотренная структурная схема использована в качестве базовой в станках для зуботочения обкатным резцом цилиндрических зубчатых колес моделей ЕЗ 13, ЕЗ-24, ЕЗ-165 и др., различающихся размерами нарезаемых колес. В этих станках внутренние связи сложных формообразующих групп состоят из механических передач и отдельных механизмов (дифференциалов, гитар сменных зубчатых колес), обеспечивающих статическую возможность задания точных передаточных отношений между исполнительными органами группы и не требуют дополнительных настроек в процессе работы. Наряду с этим внутренние механические связи при большой их протяженности, характерной для станков названных моделей, не всегда обеспечивают необходимую кинематическую точность работы формообразующих групп. На кинематическую точность внутренней связи сложной формообразующей группы влияют геометрическая неточность ее элементов и неточность их взаимного расположения, обусловленная погрешностями обработки и сборки. Существенное влияние на кинематическую точность внутренней связи оказывают температурные деформации и крутильная жесткость, определяемая взаимным углом поворота валов конечных звеньев исполнительных органов.

При сложном пространственном расположении исполнительных органов станка, большом числе промежуточных подвижных звеньев жесткие внутренние механические связи становятся громоздкими, что приводит к усложнению конструкции станка и снижению его кинематической точности. Это особенно важно для зубообрабатывающих станков, имеющих сложные разветвленные, многозвенные, механические, переналаживаемые цепи значительной протяженности, где необходимо обеспечивать жесткую связь для создания сложных формообразующих движений.

Как показывает анализ литературных и патентных источников, поиск технических решений, обеспечивающих устранение указанных недостатков, привел к созданию сложных гибридных формообразующих групп. На современном этапе эволюционного развития станочного оборудования сложились



два направления при конструировании сложных гибридных формообразующих групп, принципиально различающихся элементной базой:

- металлорежущие станки, содержащие сложные гибридные формообразующие группы, структура которых представляет объединение механических и гидравлических связей на основе современных генераторов гидравлических импульсов (ГГИ), гидравлических шаговых двигателей (ГШД) и типовых блочно-модульных гидравлических элементов (механико-гидравлические технические системы);

- металлорежущие станки, содержащие сложные гибридные формообразующие группы, структура которых представляет объединение механических и электронных связей на основе типовых интегральных схем (мехатронные технические системы).

**Механико-гидравлические технические системы.** На рисунке 2 приведена типовая структурная схема станка с внутренними гидравлическими связями в сложных формообразующих группах для зуботочения цилиндрических зубчатых колес обкатным резцом типа зуборезного долбяка [3; 4]. В первоисточниках описание структурной схемы выполнено на языке парадигмы, принятой в научно-технической экспертизе изобретений, а методика настройки вообще не рассматривается.

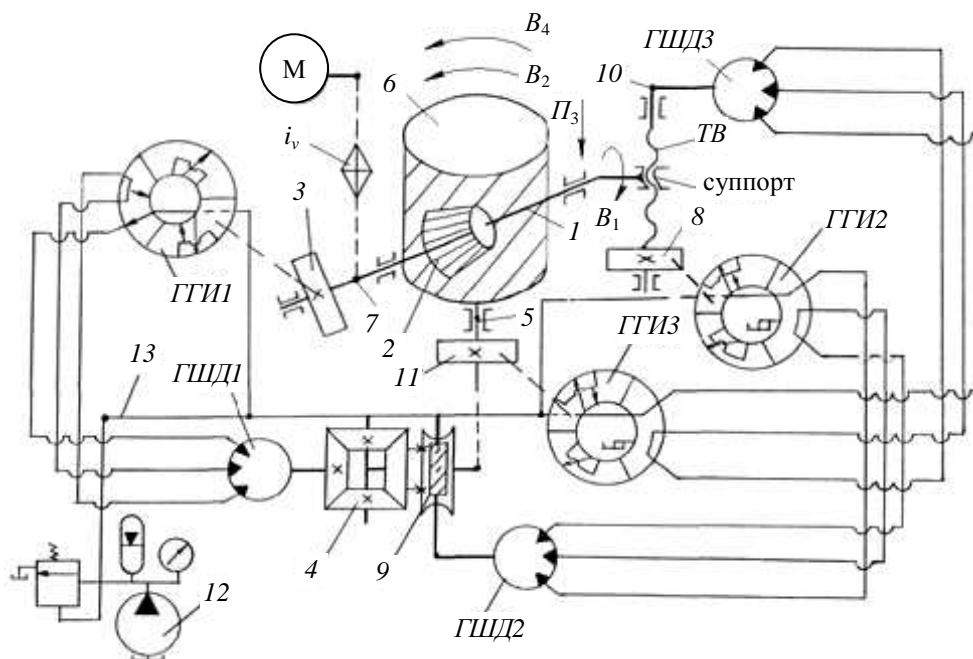


Рисунок 2. – Дифференциальная кинематическая структура станка для зуботочения с гидравлическими связями в сложных формообразующих группах

В соответствии с современной парадигмой [1] кинематическая структура станка включает две сложные гибридные формообразующие группы:  $\Phi_v(B_1B_2)$ , воспроизводящую профиль (образующую) зубьев нарезаемого колеса, и  $\Phi_s(\Pi_3B_4)$ , воспроизводящую линию зуба (направляющую) этого колеса.

Группа  $\Phi_v(B_1B_2)$  создает сложное, двухэлементарное, замкнутое движение обката. Ее внутренняя связь – кинематическая цепь, состоящая из механических передач и гидравлических блоков:

$$B_1 \rightarrow \text{шпиндель } 1 \text{ с режущим инструментом } 2 \rightarrow 3 \rightarrow \text{ГГИ1} \rightarrow \text{ГШД1} \rightarrow \\ \rightarrow \text{дифференциал } 4 \rightarrow \text{шпиндель } 5 \text{ с заготовкой } 6 \rightarrow B_2.$$

Внешняя связь – кинематическая цепь:

$$M \rightarrow i_v \rightarrow \text{звено соединения связей } 7.$$

Группа настраивается по двум параметрам: на траекторию органом настройки  $i_x$ , функцию которого выполняет ГГИ 1, на скорость резания (скорость воспроизведения профиля зубьев колеса) органом настройки  $i_v$ .

$\Phi_s(\Pi_3B_4)$  создает сложное, двухэлементарное, незамкнутое винтовое движение. Ее внутренняя связь – кинематическая цепь, также состоящая из механических передач и гидравлических блоков:

$$\Pi_3 \rightarrow \text{суппорт} \rightarrow \text{ТВ} \rightarrow 8 \rightarrow \text{ГГИ2} \rightarrow \text{ГШД2} \rightarrow 9 \rightarrow \text{дифференциал } 4 \rightarrow \text{шпиндель } 5 \rightarrow B_4.$$

Внешняя связь – кинематическая цепь:

$$\text{ГШД3} \rightarrow 10 \rightarrow \text{звено соединения связей } \text{ТВ}.$$

Особенность рассматриваемой группы – использование ГШДЗ в качестве источника энергии движения исполнительного органа – суппорта инструмента. Привод вращательного движения ротора ГШДЗ обеспечивается ГГИЗ, кинематически связанным посредством шестерни 11 со шпинделем 5 заготовки.

Группа настраивается по четырем параметрам: на траекторию органом настройки  $i_y$ , функцию которого выполняет ГГИ2; на подачу (скорость воспроизведения линии зуба) органом настройки  $i_s$ ; на исходную точку; путь по упорам системы управления.

Рабочая жидкость к генераторам гидравлических импульсов подается от насосной установки 12 по трубопроводу 13.

Обе формообразующие группы выполнены в виде отслеживающей синхронизации по схеме «задающая – ведомая координаты» [5]. В группе  $\Phi_v(B_1B_2)$  задающая координата – шпиндель 1 фрезы 2, ведомая координата – шпиндель 5 нарезаемого колеса 6. В группе  $\Phi_s(P_3B_4)$  задающая координата – шпиндель 5 нарезаемого колеса 6, ведомая координата – суппорт инструмента. Принципиальной особенностью обеих схем отслеживающей синхронизации является размещение источников энергии ведомых координат во внутренних связях формообразующих групп. Функцию задатчиков, делителей частоты и блоков задания коэффициентов деления  $k_x$  и  $k_y$  в обеих группах соответственно выполняют струйные элементы ГГИ1 и ГГИ2, преобразующие один оборот соответствующей задающей координаты в последовательность гидравлических импульсов. Конструктивно каждый ГГИ выполнен в виде набора кодирующих дисков, закрепленных на общей оси, получающей вращательное движение. Количество кодирующих дисков определяет общее число передаточных отношений расчетных цепей, совпадающих с внутренними связями обеих гибридных формообразующих групп. Один из вариантов ГГИ подробно рассмотрен в работе [3].

Коэффициенты деления  $k_x$  и  $k_y$  определяются по формулам, аналогичным формулам для определения передаточных отношений органов настройки соответственно  $i_x$  и  $i_y$  в механических расчетных цепях по известным в станковедении расчетным перемещениям. Для вывода коэффициента деления  $k_x$  РП имеют вид:

$$1 \text{ об. обкатного резца } (B_1) \rightarrow z_u / z \text{ об. заготовки нарезаемого колеса } (B_2),$$

где  $z_u$  – число зубьев обкатного резца;  $z$  – число зубьев нарезаемого колеса.

Тогда УКЦ:

$$z_u / z = 1 \cdot c_1 \cdot i_\Sigma \cdot k_x,$$

где  $c_1$  – произведение передаточных отношений постоянных передач расчетной цепи;  $i_\Sigma$  – передаточное отношение дифференциала при одном остановленном входе.

Коэффициент деления (аналог формулы настройки):

$$k_x = z_u / c_1 \cdot i_\Sigma \cdot z.$$

Расчетные перемещения для вывода коэффициента деления  $k_y$  имеют вид:

$$T \text{ мм перемещения суппорта инструмента } (P_3) \rightarrow 1 \text{ оборот заготовки нарезаемого колеса } (B_4).$$

УКЦ:

$$1 = T / t_{TB} \cdot k_y \cdot (c_2 \cdot i_\Sigma),$$

где  $c_2$  – произведение передаточных отношений постоянных передач расчетной цепи;  $i_\Sigma$  – передаточное отношение дифференциала при одном остановленном входе.

Коэффициент деления (аналог формулы настройки):

$$k_y = t_{TB} / T c_2 \cdot i_\Sigma.$$

В качестве органа настройки  $i_v$  в станках для зуботочения, как правило, используется двухколесная гитара сменных зубчатых колес. Функцию органа настройки  $i_s$  выполняет ГГИЗ. Вывод соответствующих формул настройки осуществляется по общепринятой методике для расчетных цепей скорости резания и скорости подачи по РП соответственно:

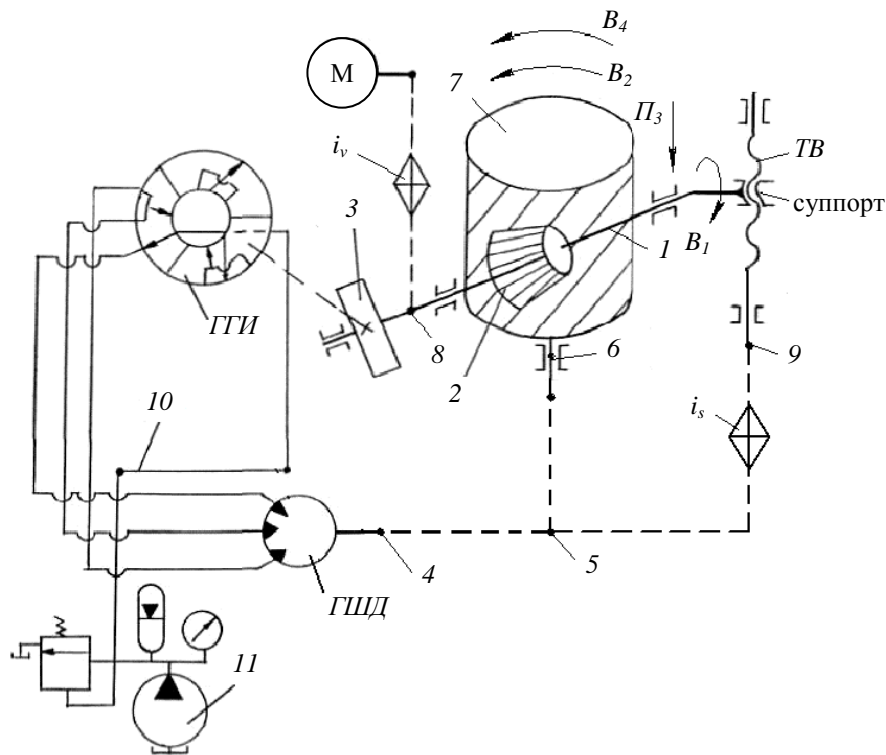
$$n \text{ мин}^{-1} \text{ электродвигателя } M \rightarrow n_u \text{ обкатного резца } 2 (B_1);$$

$$n \text{ мин}^{-1} \text{ ГШДЗ} \rightarrow s \text{ мм/мин подачи обкатного резца } 2 (P_3).$$

Уместно отметить, что в рассматриваемой схеме целесообразно ГШДЗ заменить электродвигателем с соответствующим органом настройки. В этом случае из структурной схемы исключается ГГИЗ и шестерня 11, а в качестве органов настройки  $i_v$  и  $i_s$  в соответствии с современной тенденцией можно использовать частотные преобразователи для бесступенчатого регулирования круговых частот электродвигателей.

Авторы данного направления в станковедении [6] кинематическую связь в металлорежущих станках на основе гидравлического шагового привода называют «гидравлический вал». Такой вал используется в ряде структурных схем резьбо- и зубообрабатывающих станков [7; 8], признанных изобретениями. Фундаментальные положения данного направления изложены авторами в монографии [9].

В кинематической структуре рассмотренного станка на одном исполнительном органе – шпинделе 5 заготовки – физически суммируются с помощью дифференциала 4 два элементарных движения  $B_1$  и  $B_4$ , выполняемые формообразующими группами соответственно  $\Phi_v$  и  $\Phi_s$ . Эти движения имеют одинаковую скоростную характеристику, продолжительность их одинакова, но создаются они разными источниками движения (ГШД1 и ГШД2). Следовательно, чтобы перейти к математическому (бездифференциальному) сложению, необходимо модернизировать структурную схему так, чтобы указанные движения осуществлялись одним источником движения. При этом между кинематическими группами обязательно должна быть кинематическая связь. Этим условиям удовлетворяет структурная схема, приведенная на рисунке 3.



**Рисунок 3. – Бездифференциальная кинематическая структура станка для зубочерчения с гидравлическим валом в сложной формообразующей группе**

При математическом сложении формообразующие группы  $\Phi_v(B_1B_2)$  и  $\Phi_s(P_3B_4)$  преобразуются к виду  $\Phi_v(B_1B_2+B_4)$  и  $\Phi_s(P_3)$ . Таким образом, замена физического сложения математическим упрощает кинематическую структуру станка и повышает кинематическую точность внутренней связи сложной формообразующей группы.

Группа  $\Phi_v(B_1B_2+B_4)$  создает сложное замкнутое движение обката. Ее внутренняя связь – кинематическая цепь, состоящая из механических передач и гидравлических блоков, имеет вид:

$$B_1 \rightarrow \text{шпиндель } 1 \text{ с режущим инструментом } 2 \rightarrow 3 \rightarrow \text{ГГИ} \rightarrow \\ \rightarrow \text{ГШД} \rightarrow 4 \rightarrow 5 \rightarrow \text{шпиндель } 6 \text{ с заготовкой } 7 \rightarrow B_2+B_4.$$

Внешняя связь – кинематическая цепь:

$$M \rightarrow i_v \rightarrow \text{звено соединения связей } 8.$$

Группа настраивается по двум параметрам: на траекторию органом настройки  $i_x$ , на скорость резания (скорость воспроизведения профиля зубьев колеса) органом настройки  $i_v$ .

Группа  $\Phi_s(P_3)$  создает простое незамкнутое движение подачи. Ее внутренняя связь – поступательная пара:

$$\text{суппорт обкатного резца } 2 (P_3) \rightarrow \text{вертикальные направляющие станины}.$$

Внешняя связь – кинематическая цепь:

$$M \rightarrow i_v \rightarrow 8 \rightarrow 3 \rightarrow \text{ГГИ} \rightarrow \text{ГШД} \rightarrow 4 \rightarrow 5 \rightarrow i_s \rightarrow 9 \rightarrow \text{звено соединения связей } ТВ.$$

Группа настраивается по трем параметрам: на подачу (скорость воспроизведения линии зуба) органом настройки  $i_s$ , на исходную точку и путь по упорам системы управления.

Рабочая жидкость к генератору гидравлических импульсов подается по трубопроводу 10 от насосной установки 11.

При тчении прямозубого колеса за один оборот заготовки (движение  $B_2$ ) обкатной резец совершает  $z/z_u$  оборотов (движение  $B_1$ ) и перемещается на величину  $s$  мм (движение  $P_3$ ). Для получения винтовой линии косозубого колеса при перемещении резца на величину  $s$  заготовка должна дополнительно повернуться на  $s/T$  оборота (движение  $B_4$ ), что соответствует дополнительному повороту резца на величину  $+(z/z_u) \cdot (s/T)$ . Следовательно, РП для расчетной цепи, совпадающей с внутренней связью группы обката  $\Phi_v(B_1B_2+B_4)$ , преобразуются к виду:

1 оборот шпинделя заготовки ( $B_2+B_4$ )  $\rightarrow z/z_u (1+s/T)$  оборота чашечного резца ( $B_1$ ).

УКЦ:

$$z/z_u (1+s/T) = 1 \cdot c_1 \cdot k_x.$$

Коэффициент деления (аналог формулы настройки):

$$k_x = [z/z_u (1+s/T)] / c_1,$$

где  $c_1$  – произведение передаточных отношений постоянных передач расчетной цепи.

Вывод формул настройки для органов настройки  $i_v$  и  $i_s$  выполняется по правилам, принятым для серийных станков этого класса с механическими связями.

**Мехатронные технические системы.** Известные станки с механическими связями для зуботочения обкатным резцом и для фрезерования червячными фрезами оснащают путевыми, электромеханическими, релейными системами управления циклом зубонарезания. В этих системах управление параметрами – исходное положение и путь исполнительных движений – обеспечивается упорами (кулачками), контактирующими с конечными переключателями, выполняющими функцию датчиков исполнения соответствующих движений.

Современная тенденция – замена электромеханических систем управления числовыми системами, в которых названные параметры программируются в алфавитно-цифровом коде, например *ISO-7 bit*. По библиографическим источникам известны два варианта использования систем числового программного управления в станках, содержащих сложные формообразующие группы. Первый вариант – кинематическая структура внутренних связей сложных формообразующих групп – состоит только из механических передач и традиционных механизмов (например, гитар сменных зубчатых колес, дифференциалов, реверсов). Такая кинематическая структура использована в зубошлицефрезерных полуавтоматах модели 5Б352ПФ2 и ВС-51ПФ2. Второй вариант – использование сложных, гибридных, формообразующих групп в структуре станка.

На рисунке 4 приведена структурная схема станка для зуботочения цилиндрических зубчатых колес обкатным резцом, содержащая две сложные гибридные формообразующие группы, внутренние связи которых это объединение исполнительных органов станка и электронных блоков. Обе группы выполнены по схеме равнозначных координат [5] с общим задатчиком – эталонным генератором импульсного сигнала, частота которого превышает частоту импульсных сигналов – аналогов частот вращения шпинделей инструмента, нарезаемого колеса и тягового вала суппорта. Группа  $\Phi_v(B_1B_2)$  воспроизводит профиль зубьев нарезаемого колеса (образующую). Ее внутренняя связь имеет вид:

$B_1 \rightarrow$  шпиндель 1 резца 2  $\rightarrow M_1 \rightarrow$  усилитель мощности 3  $\rightarrow$  параллельный сумматор 4  $\rightarrow$   
 $\rightarrow$  импульсно-аналоговый преобразователь 5  $\rightarrow$  делитель частоты 6  $\rightarrow$  делитель частоты 7  $\rightarrow$   
 $\rightarrow$  импульсно-аналоговый преобразователь 8  $\rightarrow$  сумматор 9  $\rightarrow$  параллельный сумматор 10  $\rightarrow$   
 $\rightarrow$  усилитель мощности 11  $\rightarrow M_2 \rightarrow$  шпиндель 12 заготовки 13  $\rightarrow B_2$ .

Внешняя связь:

высокочастотный импульсный генератор 14  $\rightarrow$  разъем 15  $\rightarrow$   
 $\rightarrow$  звено соединения связей разъем 16.

Группа настраивается по двум параметрам: на траекторию делителями частоты 6 и 7, на скорость резания (скорость воспроизведения профиля зубьев колеса) делителем частоты 6.

Группа  $\Phi_s(P_3B_4)$  воспроизводит линию зубьев по длине (направляющую) нарезаемого колеса, ее внутренняя связь имеет вид:

$P_3 \rightarrow$  суппорт 17  $\rightarrow ТВ \rightarrow M_3 \rightarrow$  усилитель мощности 18  $\rightarrow$  параллельный сумматор 19  $\rightarrow$   
 $\rightarrow$  импульсно-аналоговый преобразователь 20  $\rightarrow$  делитель частоты 21  $\rightarrow$   
 $\rightarrow$  делитель частоты 22  $\rightarrow$  импульсно-аналоговый преобразователь 23  $\rightarrow$  сумматор 9  $\rightarrow$   
 $\rightarrow$  параллельный сумматор 10  $\rightarrow$  усилитель мощности 11  $\rightarrow M_2 \rightarrow$  шпиндель 12  $\rightarrow B_4$ .

Внешняя связь:

высокочастотный импульсный генератор 14  $\rightarrow$  разъем 15  $\rightarrow$  звено соединения связей  $\rightarrow$  разъем 24.

Группа настраивается по четырем параметрам: на траекторию делителями частоты 21 и 22; на подачу (скорость воспроизведения линии зуба) делителем частоты 21; на исходную точку и путь программно посредством задания размера в коде системы числового программного управления.

В качестве  $M_1, M_2, M_3$  можно использовать синхронные электродвигатели переменного тока или высокомоментные электродвигатели постоянного тока. Делители частоты 6, 7, 21, 22 включают счетчик импульсов и блок задания коэффициента деления.

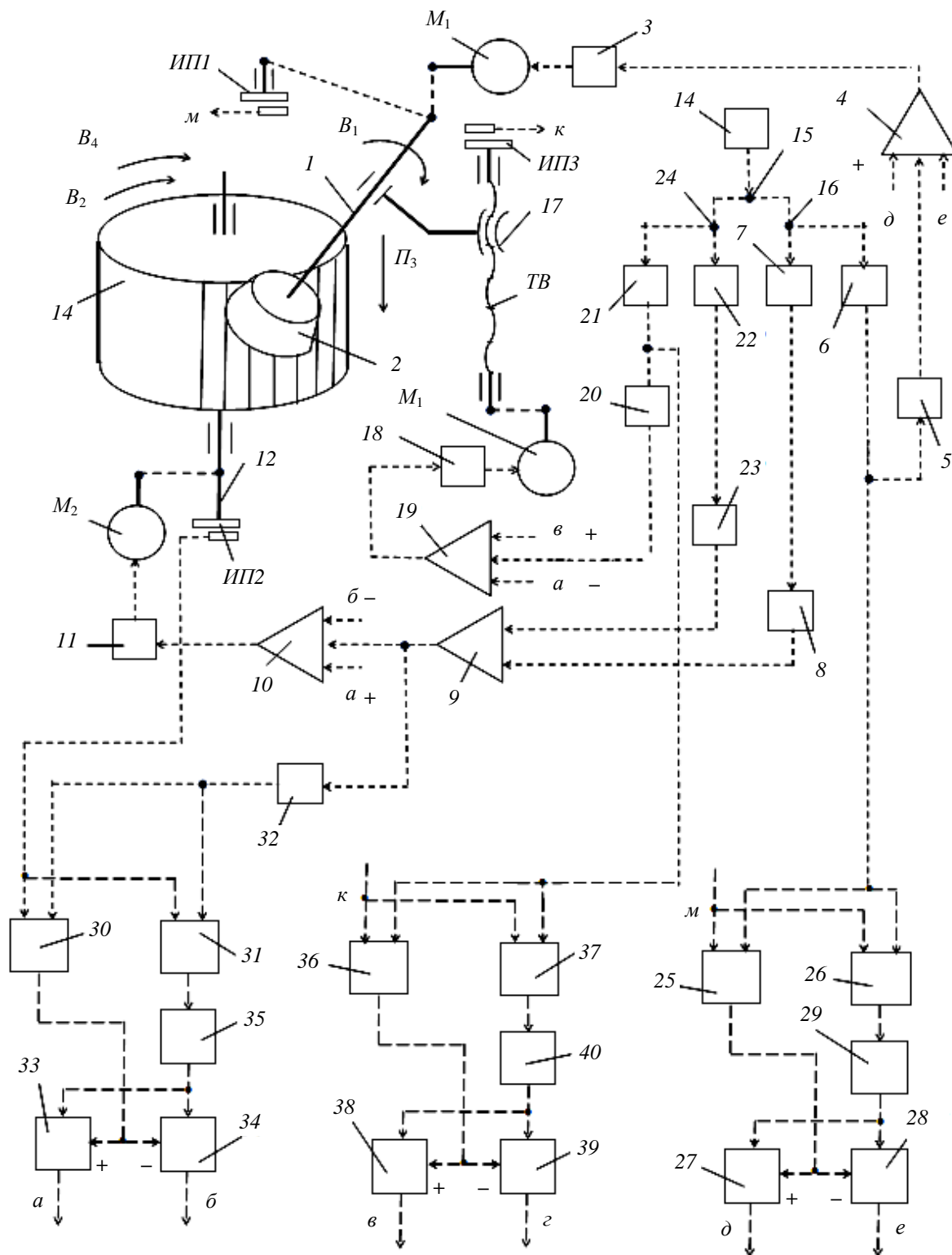


Рисунок 4. – Кинематическая структура станка для зуботочения с электронными связями в сложных формообразующих группах

Методика настройки параметров траектория и скорость обеих формообразующих групп состоит в следующем. Нормируемыми технологическими параметрами при зуботочении являются скорость резания и подача, задаваемые соответственно по круговой частоте обкатного резца и по его продольному перемещению. На делителе частоты 6 устанавливают коэффициент деления  $k_v$ , при котором на выходе счетчика этого делителя при функционировании схемы образуется импульсный сигнал – аналог напряжения переменного тока, соответствующий круговой частоте шпинделя 1 обкатного резца 2. Вывод коэффициента деления  $k_x$ , устанавливаемого на делителе частоты 7, осуществляется по известным РП:

$$1 \text{ об. обкатного резца } (B_1) \rightarrow z_u/z \text{ об. заготовки нарезаемого колеса } (B_2).$$

Тогда УКЦ для расчетной цепи, совпадающей с внутренней связью группы  $\Phi_v(B_1B_2)$ , имеет вид

$$z_u/z = 1 \cdot c_1 \cdot (n_{M1} / n_{M2}),$$

где  $c_1$  – произведение передаточных отношений постоянных передач расчетной цепи.

Круговые частоты электродвигателей  $M_1$  и  $M_2$  однозначно зависят от задающих сигналов на выходе делителей частоты 6 и 7 соответственно. Поэтому в УКЦ круговые частоты электродвигателей можно заменить коэффициентами деления. Тогда

$$z_u/z = 1 \cdot c_1 \cdot (k_v / k_x).$$

Из полученного выражения выводится коэффициент деления, устанавливаемый на делителе частоты 7:

$$k_x = c_1 \cdot k_v \cdot (z / z_u).$$

Аналогично выводятся коэффициенты деления  $k_y$  и  $k_s$  для делителей частоты 21 и 22. На делителе частоты 21 устанавливают коэффициент деления  $k_s$ , при котором на выходе счетчика этого делителя образуется импульсный сигнал – аналог напряжения переменного тока, соответствующий круговой частоте  $TB$ . Вывод коэффициента деления  $k_y$ , устанавливаемого на делителе частоты 22, осуществляется по известным РП:

$$T \text{ мм перемещения суппорта инструмента } (П_3) \rightarrow 1 \text{ об. заготовки нарезаемого колеса } (B_4).$$

УКЦ:

$$1 = c_2 (n_{M2} / n_{M3}) (T / t_{TB}) = c_2 (k_y / k_s) (T / t_{TB}),$$

где  $c_2$  – произведение передаточных отношений постоянных передач расчетной цепи.

Коэффициент деления, устанавливаемый на делителе частоты 22:

$$k_y = k_s (t_{TB} / c_2 T).$$

Функционирование сложных гибридных формообразующих групп станка осуществляется следующим образом. Эталонный генератор 14 вырабатывает высокочастотный сигнал. Этот сигнал поступает на делители частоты 6, 7, 21, 22, в которых происходит деление этого сигнала в соответствии с коэффициентами деления  $k_x$ ,  $k_y$ ,  $k_v$ ,  $k_s$ . Сигнал с выхода делителя частоты 6 преобразуется в импульсно-аналоговом преобразователе 5 в напряжение, пропорциональное частоте входного сигнала, и с его выхода через первый вход сложения – выход параллельного сумматора 4 и усилитель мощности 3 – поступает на управляемый электродвигатель  $M_1$ , сообщающий шпинделю 1 инструмента движение  $B_1$ , соответствующее скорости резания. Синхронно импульсный сигнал с выхода делителя частоты 7 преобразуется в импульсно-аналоговом преобразователе 8 в напряжение, пропорциональное частоте на его входе. С выхода этого преобразователя через первый вход сложения – выход сумматора 9, первый вход сложения – выход параллельного сумматора 10 – и усилитель мощности 11 сигнал поступает на управляемый электродвигатель  $M_2$ , который сообщает движение  $B_2$  шпинделю 12 заготовки 13 обрабатываемого колеса. В итоге такого прохождения задающего сигнала осуществляется воспроизведение профиля зубчатого колеса формообразующим движением  $\Phi_v(B_1P_2)$ .

Параллельно сигнал с выхода делителя частоты 21 преобразуется в импульсно-аналоговом преобразователе 20 в напряжение, пропорциональное частоте входного сигнала, и с его выхода через первый вход сложения – выход параллельного сумматора 19 – и усилитель мощности 18 поступает на управляемый электродвигатель  $M_3$ . Этот электродвигатель посредством  $TB$  сообщает суппорту 17 инструмента движение  $P_3$ , соответствующее продольной подаче инструмента. Синхронно импульсный сигнал с выхода делителя частоты 22 преобразуется в импульсно-аналоговом преобразователе 23 в напряжение, пропорциональное частоте на его входе. С выхода этого преобразователя через второй вход сложения – выход сумматора 9, первый вход сложения – выход параллельного сумматора 10 – и усилитель мощности 11 сигнал поступает на управляемый электродвигатель  $M_2$ , который сообщает дополнительное движение  $B_4$  шпинделю 12 обрабатываемой заготовки 13. В итоге такого прохождения задающего сигнала осуществляется воспроизведение линии зубьев колеса формообразующим движением  $\Phi_s(P_3 B_4)$ .

В сложных гибридных формообразующих группах основным источником погрешностей, снижающих качественные показатели обрабатываемой поверхности, является девиация механики исполнительных органов этих групп. Технических решений для устранения этого явления в гибридных механико-гидравлических формообразующих группах в профильной литературе нет.

В мехатронных формообразующих группах явление девиации можно устранить посредством модификации внутренних связей, обеспечивающей непрерывную, двухстороннюю коррекцию задающих сигналов управления электродвигателями исполнительных органов. Для этого (см. рисунок 4) на шпиндель  $I$  инструмента, шпиндель  $12$  нарезаемой заготовки и  $TB$  устанавливаются измерительные преобразователи  $ИП1$ ,  $ИП2$ ,  $ИП3$  соответственно [10]. Во внутренние связи обеих формообразующих групп включают три (по числу регулируемых исполнительных электродвигателей) модуля.

Модуль коррекции круговой частоты шпинделя  $I$  (движение  $B_1$ ) инструмента содержит знаковый  $25$  и фазовый  $26$  дискриминаторы. Первые входы этих дискриминаторов соединены с выходом делителя частоты  $6$ , а вторые входы – с  $ИП1$ . Выход знакового дискриминатора  $25$  соединен с управляющим входом ключа  $27$ , управляемого положительным потенциалом, и с управляющим входом ключа  $28$ , управляемого отрицательным потенциалом. Выход фазового дискриминатора  $26$  соединен с входом импульсно-аналогового преобразователя  $29$ , а выход этого преобразователя – с аналоговыми входами ключей  $27$  и  $28$ . Выходы ключей  $27$  и  $28$  соединены соответственно со вторым входом сложения и входом вычитания параллельного сумматора  $4$ .

Модуль коррекции круговой частоты шпинделя  $12$  (движение  $B_2+B_4$ ) нарезаемой заготовки содержит знаковый  $30$  и фазовый  $31$  дискриминаторы. Первые входы этих дискриминаторов соединены с выходом аналого-импульсного преобразователя  $32$ , вход которого соединен с выходом сумматора  $9$ . Вторые входы дискриминаторов соединены с  $ИП2$ , установленном на шпинделе  $12$ . Выход знакового дискриминатора  $30$  соединен с управляющим входом ключа  $33$ , управляемого положительным потенциалом, и с управляющим входом ключа  $34$ , управляемого отрицательным потенциалом. Выход фазового дискриминатора  $31$  соединен с входом импульсно-аналогового преобразователя  $35$ , а выход этого преобразователя – с аналоговыми входами ключей  $33$  и  $34$ . Выходы ключей  $33$  и  $34$  соединены соответственно со вторым входом сложения и входом вычитания параллельного сумматора  $10$ .

Модуль коррекции продольной подачи (движение  $П_4$ ) суппорта  $17$  содержит знаковый  $36$  и фазовый  $37$  дискриминаторы. Первые входы этих дискриминаторов соединены с выходом делителя частоты  $21$ , а вторые входы – с  $ИП3$ . Выход знакового дискриминатора  $36$  соединен с управляющим входом ключа  $38$ , управляемого положительным потенциалом, и с управляющим входом ключа  $39$ , управляемого отрицательным потенциалом. Выход фазового дискриминатора  $37$  соединен с входом импульсно-аналогового преобразователя  $40$ , а выход этого преобразователя – с аналоговыми входами ключей  $38$  и  $39$ . Выходы ключей  $38$  и  $39$  соединены соответственно со вторым входом сложения и входом вычитания параллельного сумматора  $19$ .

Коррекция задающего сигнала, действующего на выходе параллельного сумматора  $4$ , осуществляется следующим образом. На первых входах знакового  $25$  и фазового  $26$  дискриминаторов постоянно действует задающий импульсный сигнал с выхода делителя частоты  $6$ . На вторые входы обоих дискриминаторов непрерывно с  $ИП1$  поступает импульсный сигнал – аналог скорости движения  $B_1$  шпинделя  $I$  инструмента. В результате непрерывного сравнения сигналов на выходе знакового дискриминатора образуется отрицательный потенциал при отставании шпинделя  $I$  от заданного значения и положительный потенциал при его опережении. Этот потенциал поступает на управляющие входы ключей  $27$  и  $28$ . Синхронно на выходе фазового дискриминатора  $26$  непрерывно образуется сигнал абсолютной погрешности, который после преобразования в аналоговую форму в импульсно-аналоговом преобразователе  $29$  поступает на аналоговые входы ключей  $27$  и  $28$ . Этот сигнал поступает на параллельный сумматор  $4$  через один из ключей в зависимости от знака управляющего воздействия. При отставании шпинделя инструмента от заданного значения сигнал абсолютной погрешности поступает через ключ  $28$ , управляемый отрицательным потенциалом, на второй вход сложения параллельного сумматора  $4$ , а при опережении этот сигнал поступает через ключ  $27$ , управляемый положительным потенциалом, на вход вычитания этого сумматора. В итоге в параллельном сумматоре  $4$  происходит в зависимости от знака погрешности увеличение или уменьшение управляющего сигнала, т.е. происходит непрерывная, двухсторонняя коррекция круговой частоты шпинделя инструмента относительно номинального значения. В системах управления станочным оборудованием такую коррекцию функционирования исполнительного органа принято называть адаптивным управлением.

Аналогично осуществляется коррекция круговой частоты шпинделя  $12$  нарезаемого колеса (движение  $B_2+B_4$ ) и продольной подачи (движение  $П_4$ ) суппорта  $17$  соответствующими модулями.

**Заключение.** С позиций современной парадигмы познания металлорежущих станков, основанной на теории воспроизведения реальных поверхностей в машиностроении и двух законов механики: разветвление энергии движения в кинематических цепях и принцип возможных перемещений, рассмотрена эво-

люция развития металлорежущих станков, реализующих способ зуботочения обкатным резцом типа зуборезного долбяка. На основе анализа типовой кинематической структуры станка с механическими связями для зуботочения *установлены* причины создания сложных гибридных формообразующих групп, воспроизводящих траекторию сложного исполнительного движения. *Выявлены* по патентным и литературным источникам *два вида сложных гибридных формообразующих групп*, принципиально различающихся элементной базой. *Первый вид* – сложные гибридные формообразующие группы, структура которых представляет объединение механических и гидравлических связей на основе современных генераторов гидравлических импульсов, гидравлических шаговых двигателей и типовых блочно-модульных гидравлических элементов. *Второй вид* – сложные гибридные формообразующие группы, структура которых представляет объединение механических и электронных связей на основе типовых интегральных схем. *Рассмотрена* методика анализа и настройки обоих видов сложных гибридных формообразующих групп на примерах механико-гидравлического и мехатронного станков для зуботочения обкатным резцом типа долбяка.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Голембиевский, А.И. Эволюция познания и методики преподавания металлорежущих станков / А.И. Голембиевский // Вестник Полоцкого государственного университета. Сер. В, Промышленность. Прикладные науки. – 2016. – № 11. – С. 2–11.
2. Голембиевский, А.И. Частная методика создания способов формообразующей обработки в машиностроении / А.И. Голембиевский // Вестник Полоцкого государственного университета. Сер. В, Промышленность. Прикладные науки. – 2017. – № 3. – С. 2–8.
3. Станок с гидравлическими связями для нарезания цилиндрических зубчатых колес методом зуботочения : заявка RU 95111229/02 / В.Ф. Ванин. – Оpubл. 1997.
4. Блочно-модульная структура формообразующих цепей металлорежущих станков на основе шагового гидропривода / В.А. Ванин [и др.] // Вестн. МГТУ «Станкин». – 2009. – № 1 (5). – С. 13–22.
5. Голембиевский, А.И. Эволюция развития сложных формообразующих групп металлорежущих станков / А.И. Голембиевский // Вестник Полоцкого государственного университета. Сер. В, Промышленность. Прикладные науки. – 2017. – № 11. – С. 2–8.
6. Трифонов, О.А. «Гидравлический вал» в приводе металлорежущих станков / О.А. Трифонов, В.А. Ванин // Гидравлические системы металлорежущих станков : межвуз. сб. науч. тр. ; под ред. О.Н. Трифонова. – М. : Станкин, 1977. – Вып. 2. – С. 98–104.
7. Кинематическая структура зубо- и резьбообрабатывающих станков с гидравлическими связями в формообразующих цепях / В.А. Ванин [и др.] // Вестн. Тамбов. гос. техн. ун-та. – 2012. – Т. 18, № 1. – С. 220–229.
8. Ванин, В.А. Построение внутренних (формообразующих) цепей металлорежущих станков на основе шагового привода / В.А. Ванин, А.Н. Колодин, И.В. Облицов // Вестн. Тамбов. гос. техн. ун-та. – 2015. – Т. 21, № 3. – С. 13–22.
9. Ванин, В.А. Кинематическая связь в металлорежущих станках на основе гидравлического шагового привода / В.А. Ванин, С.В. Мищенко, О.А. Трифонов. – М. : Машиностроение, 2005. – 328 с.
10. Устройство для синхронизации приводов исполнительных органов шлицефрезерного станка : пат. ВУ 16976 / А.И. Голембиевский. – Оpubл. 26.12.2012.

Поступила 04.01.2018

#### EVOLUTION OF THE DEVELOPMENT OF THE KINEMATIC STRUCTURE OF METAL-STOCKING MACHINES FOR PROCESSING BY THE TURNING CUTTING TYPE WITH A CUTTER-TYPE CHISEL CUTTER

**A. GOLEMBIEVSKI**

*A purposeful evolution of the development of metal-cutting machines for processing cylindrical gears with a cutter-type chisel cutter is considered. Metal-cutting machine for the pricking as a union of kinematic groups of various functional purposes. The determining role of forming groups in the formation of the kinematic structure of metal-cutting machines. Simple and complex form-building groups. Complex hybrid mechanical-hydraulic and mechatronic form-building groups. Mechanic-hydraulic and mechatronic structural diagrams of machine tools for gearing with a cutter-type cutter of cylindrical gears. Kinematic analysis and tuning features.*

**Keywords:** *chiseling, metal-cutting machines for gearing cylindrical wheels, forming groups, hybrid mechanical-hydraulic and mechatronic groups, kinematic analysis, adjustment.*



УДК 621.774

## РАЗВИТИЕ МЕТОДА РАСЧЕТА ТЕПЛОВЫДЕЛЕНИЙ ОТ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ХОЛОДНОЙ ПИЛЬГЕРНОЙ ПРОКАТКЕ ТРУБ

канд. техн. наук, доц. С.В. ПИЛИПЕНКО

(Национальная металлургическая академия Украины, Днепр, Украина);

канд. техн. наук, доц. А.В. ДУДАН

(Полоцкий государственный университет)

Рассмотрены основные существующие на данный момент зависимости, позволяющие правильно рассчитать тепловыделения от пластической деформации при холодной пильгерной валковой прокатке труб. На основе имеющихся зависимостей предложено дальнейшее развитие метода расчета тепловыделений, позволяющее учитывать особенности представленного процесса. Результаты проверены расчетом параметров рабочих поверхностей деформационного инструмента станов холодной пильгерной валковой прокатки с последующей прокаткой промышленных партий труб из титановых сплавов, что доказывает действенность метода.

**Ключевые слова:** пластическая деформация, тепловыделения, деформационный инструмент, рабочая поверхность, холодная пильгерная валковая прокатка.

**Введение.** Холодная прокатка труб на станах (ХПТ) – процесс периодического действия, параметры которого изменяются вдоль конуса деформации вследствие изменения геометрических параметров деформирующего инструмента. Этот процесс широко применяется для производства холодно- и теплодеформированных прецизионных труб широкого спектра марок сталей и сплавов [1]. Кроме холодной и теплой прокатки в процессе ХПТ применяют безэмульсионную прокатку, когда трубы прокатываются без применения охлаждающей эмульсии, а только лишь с нанесением солевой смазки вне стана.

**Постановка задачи.** Процесс ХПТ характеризуется большой динамичностью, даже в станах старой конструкции имелась возможность прокатки труб со скоростью 100...120 двойных ходов клетки в минуту. В современных станах количество двойных ходов достигает 280 и более в минуту, что может вызывать значительные тепловыделения от пластической деформации. Причем этот процесс происходит в мгновенном очаге деформации за считанные доли секунды. Применение охлаждающей эмульсии значительно снижает тепловыделения – температура конуса не превышает 60...70 °С.

В мгновенном очаге вызванные тепловыделения могут оказать существенное влияние на силовые и деформационные параметры процесса деформации. В свою очередь, скорость деформации влияет на изменение механических характеристик.

**Анализ исследований.** Вопросам учета тепловыделений в ходе пластической деформации уделялось значительное внимание. Известно, что выделение тепла при адиабатических условиях пластического течения пропорционально накоплению пластической деформации [2–5]:

$$\Delta T_{\text{оэф}} = \frac{\sigma_T \dot{\epsilon}_i \tau_n}{c \cdot \rho}, \quad (1)$$

где  $c$  – удельная теплоемкость металла заготовки Дж/(кг·град);  $\rho$  – плотность металла;  $\dot{\epsilon}_i$  – интенсивность скорости деформации;  $\tau_n$  – время процесса;  $\sigma_T$  – предел текучести деформируемого металла.

В процессах остаточной пластической деформации, по существу, вся энергия деформации превращается в тепло, поэтому такие процессы необратимы [6]. Энергия упругой деформации в данном случае очень мала и может быть приравнена к нулю. Поэтому можно считать

$$Q_{\text{оэф}} = \frac{1}{A} \int_{\epsilon_0}^{\epsilon_i} \sigma_i d\epsilon. \quad (2)$$

Согласно [5], компоненты тензора деформации для осесимметричного напряженного состояния (где положение любой точки определяется радиус-вектором  $\rho$ , полярным углом  $\theta$  и аппликатай  $x$ ) можно рассчитать из зависимостей:

$$\epsilon_x = \mu, \quad (3)$$

$$\epsilon_\rho = \frac{a}{2} \left( 1 + \left( \frac{r}{R} \right)^2 \right), \quad (4)$$

$$\varepsilon_{\theta} = \frac{a}{2} \left( 1 - \left( \frac{r}{R} \right)^2 \right), \quad (5)$$

где  $\mu$  – вытяжка;  $r$  и  $R$  – внешний и внутренний диаметр трубы соответственно.

Интенсивность скорости деформации при объемном осесимметричном напряженно-деформированном состоянии можно определить по следующей формуле [7]:

$$\dot{\varepsilon}_i = \varepsilon_x \sqrt{1 + \frac{K^2}{3}}. \quad (6)$$

Здесь  $K = (\varepsilon_x - \varepsilon_{\theta}) / \varepsilon_p$ .

Изменение температуры в результате работы сил поверхностного трения:

$$\Delta T_{mp} = \frac{f \cdot F_k \cdot V_{мет} p_{cp}}{2(D_{об} - D_i)\lambda}, \quad (7)$$

где  $f$  – коэффициент трения;  $F_k$  – площадь контакта;  $\lambda$  – теплопроводность;  $p_{cp}$  – среднее удельное давление;  $V_{мет}$  – объём деформируемого металла.

В ходе пластической деформации наблюдаются тепловые потери от теплоизлучения, теплопередачи на рабочий инструмент (валки) и от теплопередачи охлаждающей жидкости в случае её применения.

Величину этих потерь можно учесть в той или иной степени.

Потери от теплоизлучения [8]:

$$\Delta T_{пот} = 1,07 \frac{C_u \cdot C_0 \cdot \frac{T_{мет}}{100} \cdot F_u \cdot (\tau_u - \tau_n)}{3600\rho \cdot M_{мет}}. \quad (8)$$

Здесь  $C_u$  – степень черноты металла;  $C_0$  – коэффициент излучения абсолютно черного тела;  $F_u$  – площадь излучения;  $M_{мет}$  – масса металла;  $T_{мет}$  – температура металла трубы;  $\tau_u$  – время двойного хода;  $\tau_n$  – время, на протяжении которого рассматриваемая площадь излучения контактирует с поверхностью валков (т.е. деформируется в мгновенном очаге деформации).

Потери от теплопередачи на инструмент [6]:

$$\Delta T_{пот} = \frac{2 \cdot F_k (T_{мет} - T_{вал}) \tau_n \alpha}{M_{мет} C_T}, \quad (9)$$

где  $F_k$  – площадь контакта металла с инструментом;  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи;  $P$  – удельный вес ( $\text{кг}/\text{см}^3$ );  $T_{вал}$  – температура металла валков.

Как показывают результаты ранее проведённого исследования [9], температура калибров при безэмульсионной прокатке ниже температуры поверхности конуса на 30...45 °С; при использовании эмульсии температура калибров находится в пределах 40...50 °С.

Цель представляемого исследования – развитие метода расчета тепловыделений от пластической деформации при холодной пильгерной прокатке труб с целью более точного учета особенностей процесса такой деформации.

**Основная часть.** Известно, что при пильгерной прокатке соблюдается следующее основное правило: обжатие трубы вдоль конуса деформации за цикл равно разнице геометрических параметров в рассматриваемом сечении и сечении, которое отстоит от него на таком расстоянии ( $\Delta x$ ), при котором объём металла, находящийся между этими сечениями, равен объёму подачи (рисунок 1) [2–4; 10].

Величина  $\Delta x$  в начале конуса равна величине подачи, а в конце конуса – полному линейному смещению за двойной ход клетки. Изменение величины  $\Delta x$  вдоль конуса деформации (рисунок 2) можно определить из зависимости [11]:

$$\Delta x = \frac{\sqrt{S_x + 2(\text{tg}\gamma_x - \text{tg}\alpha_x) \frac{mS_3(S_3 - D_3)}{D_x - S_x}} - S_x}{\text{tg}\gamma_x - \text{tg}\alpha_x}. \quad (10)$$

Здесь  $S_x$  – толщина стенки трубы в сечении;  $\text{tg}\gamma_x$  и  $\text{tg}\alpha_x$  – конусность развертки калибра и оправки на участке.

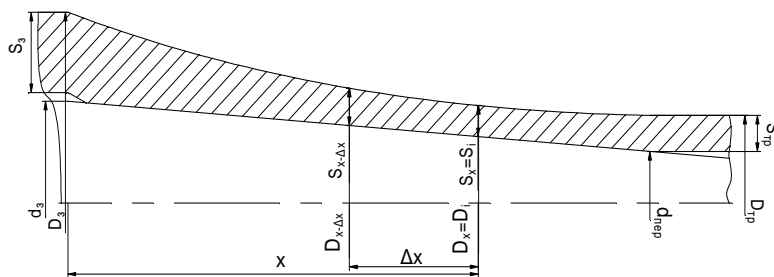


Рисунок 1. – Схема к расчету величины обжатия вдоль конуса деформации при пильгерном процессе [12]

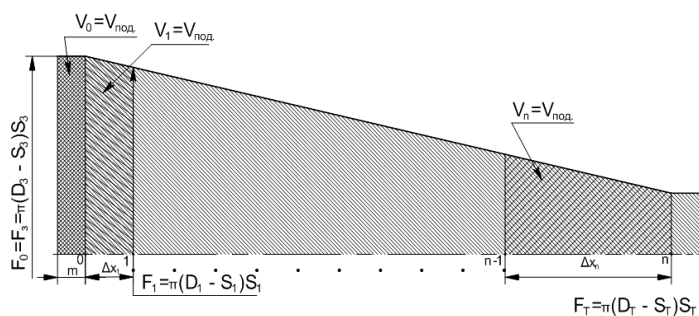


Рисунок 2. – Схема к определению числа циклов обжатий при периодической прокатке [12]

Заметим, что рассуждения относительно деформационных параметров, можно применить и к тепловым (рисунок 3). Рассчитывая приращение температуры от цикла к циклу вдоль всего конуса (с учетом потерь) и суммируя данные величины от сечения к сечению (см. рисунок 3), можно достаточно точно определить изменение температуры металла в ходе ведения процесса периодической прокатки:

$$T_x = T_{x-\Delta x} + \Delta T_x - \Delta T_{ном}. \tag{11}$$

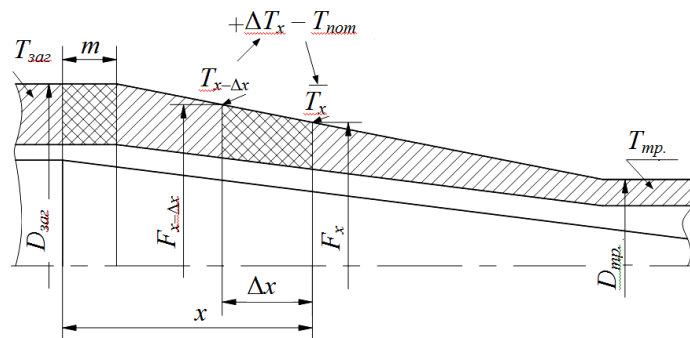


Рисунок 3. – Схема к расчету величины приращения температуры металла в сечениях конуса деформации при пильгерном процессе

Расчет температуры в сечениях конуса деформации с применением формулы (11) выглядит следующим образом: рассчитываются изменения всех геометрических и деформационных параметров вдоль конуса деформации [11; 12]; рассчитываются изменения величины  $\Delta x$  (формула (10)) от нулевого сечения до сечения  $n$  (см. рисунок 3); определяются приращения температуры от тепловыделений из-за пластической деформации (формула (1)) и поверхностного трения в сечениях  $x$  (формула (7)); пошагово, от сечения  $x - \Delta x$  до соответствующего ему сечения  $x$  (см. рисунок 3), начиная от сечения входа, рассчитываются значения температуры (формула (11)) начиная от заданной величины температуры заготовки; корректируются величины потерь на конвекцию и теплопередачу (формулы (8) и (9)).

Для анализа корректности работы модели выбран маршрут прокатки труб из титанового сплава Gr-2 на стане ХПТ-32 – 25×3...16,15×1,63.

Использовалась безэмульсионная прокатка.

В ходе прокатки пирометром с лазерным прицелом произведены замеры температуры наружной поверхности конуса в трех характерных для калибровки точках (таблица 1): начале конуса деформации; двух точках вдоль зоны обжатия и в центре зоны калибровки. Точки выбраны из расчета более точного определения их места расположения на конусе деформации (были расставлены метки).

Таблица 1. – Температура металла в зонах конуса деформации при прокатке труб из сплава Gr 2 по маршруту 25×3...16,15×1,63 (подача 4 мм, 60 дв. ход.)

№ прокатываемой трубы от начала процесса прокатки (после простоя стана)	Колебания температуры поверхности трубы в зонах конуса деформации, °С			
	зона редуцирования (40...45 мм*)	зона обжатия стенки (90...95 мм*)	зона обжатия стенки (200...205 мм*)	зона калибровки (середина зоны)
4 и далее	120...132	207...219	242...259	101...112
* – расстояние от начала конуса деформации.				

Далее, из параметров калибровки согласно предложенному методу рассчитаны все необходимые геометрические, кинематические и силовые параметры. Как результат – смоделировано изменение величины температуры конуса деформации в контрольных сечениях зоны редуцирования и обжатия стенки (рисунок 4).

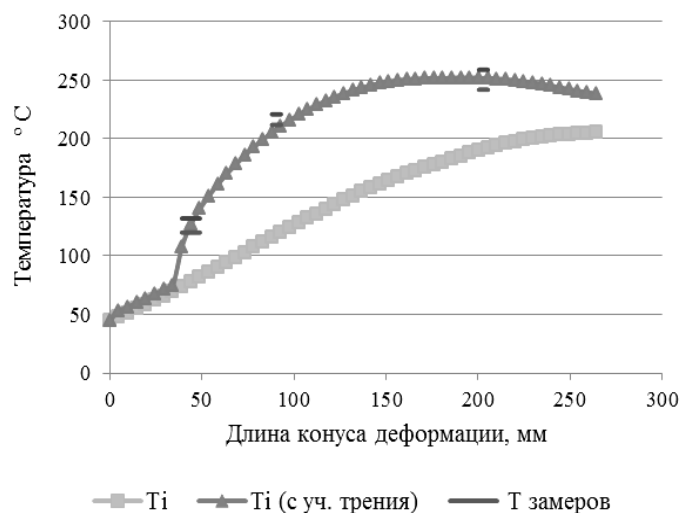


Рисунок 4. – Результаты моделирования изменения температуры наружной поверхности конуса деформации в зонах редуцирования и обжатия стенки при прокатке трубы из титанового сплава Gr-2 на стане ХПТ-32 по маршруту 25×3...16,15×1,63

Как видно из результатов моделирования (см. рисунок 4), линия тренда значений замеров совпадает с результатами моделирования в достаточной для использования предложенного метода мере.

**Заключение.** Исходя из результатов проведенного исследования предложено развитие метода расчета тепловыделений от пластической деформации при холодной пильгерной прокатке труб. На основе имеющихся зависимостей предложен метод расчета тепловыделений, позволяющий учитывать особенности процесса ХПТ. Результаты расчетов проверены в ходе экспериментального исследования холодной пильгерной валковой прокатки труб из титановых сплавов и доказали действенность метода.

По итогам моделирования величины тепловыделений сделан *вывод*: при применении безэмульсионной прокатки значительная часть тепловыделений происходит от воздействия сил трения.

#### ЛИТЕРАТУРА

- Balakin, V.F. Influence of the parameters of the process of the cold pilger tube rolling on the Q-factor distribution along the cone of deformation / V.F. Balakin, S.V. Pilipenko // Itatube-journal. – 2016. – № 1. – P. 94–97.
- Журавлев, Г.М. Расчет температурного поля в зоне пластической деформации / Г.М. Журавлев, Дао Тиен Той // Изв. ТулГУ. Технические науки. Сталь. – 2012. – № 2. – С. 221–227.

3. Смирнов, В.С. Теория обработки металлов давлением / В.С. Смирнов. – М. : Metallurgy, 1973. – 796 с.
4. Томленов, А.Д. Теория деформирования металлов / А.Д. Томленов. – М. : Metallurgy, 1972. – 402 с.
5. Колмогоров, В.Л. Напряжения, деформации, разрушение / В.Л. Колмогоров. – М. : Metallurgy, 1970. – 229 с.
6. Томсен, Э. Механика пластических деформаций при обработке металлов / Э. Томсен, Ч. Янг, Ш. Кобаяши. – М. : Машиностроение, 1969. – 504 с.
7. Онищенко, И.И. Механика сплошной среды. Теория пластичности / И.И. Онищенко. – Киев : Изд-во КР «Политех», 1996. – 274 с.
8. Яловой, Н.И. Тепловые процессы при обработке металлов и сплавов давлением / Н.И. Яловой. – М. : Высш. шк., 1973. – 631 с.
9. Пилипенко, С.В. Развитие метода расчета параметров холодной пильгерной прокатки при заданном распределении развалки для получения регламентированной поперечной разностенности труб : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05 03 05 / С.В. Пилипенко. – Никополь, 2009. – 18 с.
10. Тетерин, П.К. Теория периодической прокатки / П.К. Тетерин. – М. : Metallurgy, 1978. – 256 с.
11. Орро, П.И. Производство стальных тонкостенных труб / П.И. Орро, Я.Е. Осада. – М. ; Харьков : Metallurgizdat, 1951. – 416 с.
12. Шевакин, Ю.Ф. Калибровка и усилия при холодной прокатке труб / Ю.Ф. Шевакин. – М. : Metallurgizdat, 1963. – 269 с.

Поступила 12.02.2018

#### DEVELOPMENT OF THE METHOD OF CALCULATION OF HEAT EXCHANGES FROM PLASTIC DEFORMATION AT COLD PILGRER ROLLER PIPE

*S. PILIPENKO, A. DUDAN*

*The main current dependencies are considered, which allow correctly calculate the heat release from plastic deformation during cold pilger roll rolling of pipes. On the basis of the available dependencies, it is proposed to further develop the method of calculating the thermal divisions, which makes it possible to take into account the features of the presented process. The results of the calculations are checked during the practice of calculating the working parameters of the working surfaces of the deformation tool for cold piston roller rolling and prove the validity of the method.*

**Keywords:** *plastic deformation, heat release, deformation tool, working surface, cold pilger rolling.*

УДК 669.7:624.01

## УМЕНЬШЕНИЕ ДЕФОРМАЦИЙ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

чл.-кор. НАН Беларуси, д-р техн. наук, проф. Ф.И. ПАНТЕЛЕЕНКО;  
канд. техн. наук, доц. О.В. ШУМОВ

(Белорусский национальный технический университет, Минск)

*Рассматриваются некоторые мероприятия по снижению остаточных деформаций сварных соединений. Исследования по снижению остаточных поперечных деформаций выполнены для сварных соединений, полученных дуговой сваркой в среде аргона. Предложено снизить остаточные поперечные деформации сварных соединений за счет использования твердого диоксида углерода для уменьшения области нагрева металла до высоких температур, а также за счет подбора оптимальных режимов дуговой сварки. Определены значения поперечных деформаций сварных соединений, полученных дуговой сваркой в среде аргона как в обычных условиях, так и с использованием твердого диоксида углерода. Получены функциональные зависимости влияния технологических параметров сварки на поперечные деформации, по которым найдены оптимальные режимы дуговой сварки с охлаждением для обеспечения малых остаточных деформаций. Установлено, что использование твердого диоксида углерода при дуговой сварке обеспечивает уменьшение остаточных поперечных деформаций сварных соединений в 1,6 раза по сравнению со сварными соединениями, полученными дуговой сваркой без охлаждения.*

**Ключевые слова:** дуговая сварка, сварное соединение, остаточные деформации, оптимальные режимы, уменьшение деформаций.

**Введение.** Один из распространенных способов изготовления различных конструкций из листовых заготовок в настоящее время – дуговая сварка, предусматривающая локальный нагрев соединяемых деталей до высоких температур. Неравномерный нагрев, неоднородное охлаждение, протекающие в металле фазовые превращения и т.п. приводят к возникновению в соединяемых деталях значительных напряжений и деформаций, которые могут вызвать отклонения от требуемых размеров и формы конструкций, ухудшить их эксплуатационные свойства [1]. Таким образом, снижение остаточных деформаций сварных соединений является актуальной задачей, решение которой обеспечивает повышение качества сварных изделий, улучшение их эксплуатационных свойств.

Существующие методы снижения напряжений и деформаций при сварке конструкций включают механическое воздействие, уменьшение тепловложения в металл, управление напряженным состоянием за счет комбинирования нагрева и охлаждения участков конструкции и т.п. [2]. Вместе с тем указанные методы могут оказаться недостаточными при дуговой сварке конструкций из тонколистовых заготовок (толщиной до 4 мм) из аустенитной стали, так как они не обеспечивают в полной мере компенсацию температурных напряжений и предотвращение недопустимых деформаций и искажений формы конструкций [3].

**Основная часть.** Степень изменения напряжений и деформаций при дуговой сварке однофазных материалов, не испытывающих при нагреве и охлаждении фазовых превращений, определяется закономерностями распределения температурных полей в соединяемых деталях, условиями их закрепления при сварке [4]. Эффективным направлением снижения напряжений и деформаций при дуговой сварке тонколистовой аустенитной стали выступает применение комбинированных методов, среди которых перспективным представляется одновременное использование метода термического растяжения и метода сварки с принудительным охлаждением высокотемпературной области сварного соединения [5; 6]. Рациональным подходом при использовании комбинированных методов снижения сварочных напряжений и деформаций служит математическое моделирование термонапряженного состояния соединяемых деталей, позволяющего сократить количество экспериментов и выполнить оптимизацию режимов дуговой сварки [7].

В ходе исследований выполнены расчеты по определению температурных полей, а также полей напряжений и деформаций при дуговой сварке в среде аргона тонколистовых заготовок из однофазного материала. При численном моделировании анализировался технологический процесс, который включал соединение встык при помощи дуговой сварки двух плоских заготовок из стали 12Х18Н10Т толщиной 4 мм.

Для определения величины напряжений и деформаций в деталях и оптимизации технологических режимов при дуговой сварке выполнен несовместный термомеханический анализ, состоящий из двух этапов. Первый этап анализа – определение тепловой истории процесса дуговой сварки – включал определение значений температур в узлах исследуемого трехмерного пространства для различных моментов времени за счет моделирования процессов распространения тепла от движущейся сварочной дуги. Второй этап анализа – исследование напряженно-деформированного состояния металла свариваемых деталей – включал определение значений напряжений и деформаций в них путем решения уравнений статической упругости на основе информации о тепловых полях свариваемых деталей.

Для определения значений температур нагрева соединяемых деталей для различных интервалов времени находили решение дифференциального уравнения теплопроводности с начальными и граничными условиями в ходе исследования процесса дуговой сварки с движущимся источником тепла. Для моделирования теплового воздействия сварочной дуги использовалась неосесимметричная модель источника тепла в форме двойного эллипсоида с распределением плотности теплового потока по закону Гаусса [8].

Плотность мощности электрической сварочной дуги в произвольном квадранте трехмерного пространства определялся по формуле:

$$q_{arc}(x, y, z, t) = 6f_i \cdot q_0 \sqrt{3} \cdot (a \cdot b \cdot c \cdot \pi \cdot \sqrt{\pi})^{-1} \cdot \exp\{-3 \cdot [x^2 \cdot a^{-2} + y^2 \cdot b^{-2} + (z - z_0 - v \cdot t)^2 \cdot c_1^{-2}]\},$$

где  $q_{arc}(x, y, z, t)$  – плотность мощности, Вт/м<sup>3</sup>;  $q_0$  – чистый тепловой поток, Вт;  $a, b, c$  – параметры, описывающие ширину теплового воздействия источника по осям  $x, y, z$  соответственно, мм;  $v$  – скорость перемещения источника тепла, м/с;  $f_f$  и  $f_r$  – доли тепла, выделяемые в переднем или заднем квадрантах трехмерного пространства соответственно ( $f_f + f_r = 2$ ).

Термический анализ включал операции определения теплофизических свойств материалов свариваемых деталей, моделирования процессов передачи тепла от движущейся сварочной дуги, разработки конечно-элементной модели, вычисления значений температуры нагрева металла в зависимости от координат и времени сварки.

Значение температур нагрева металла определяли в результате решения дифференциального уравнения теплопроводности для трехмерного пространства [9]:

$$\rho \cdot C_p \cdot \partial T / \partial t = \partial (\lambda \cdot \partial T / \partial x) / \partial x + \partial (\lambda \cdot \partial T / \partial y) / \partial y + \partial (\lambda \cdot \partial T / \partial z) / \partial z + Q,$$

где  $\rho$  – плотность материала, кг/м<sup>3</sup>;  $C_p$  – удельная теплоемкость, Дж/кг·°С;  $T$  – температура, °С;  $\lambda$  – теплопроводность, Вт/м·°С;  $Q$  – входящий тепловой поток, Вт/м<sup>3</sup>.

Так как нагрев от действия сварочной дуги рассматривался не в виде тепловых граничных условий, а в виде распределения внешнего теплового потока, то для учета радиационных и конвективных потерь тепла поверхности свариваемых деталей рассматривались как поглощающие тепло границы, а выражение для определения входящего теплового потока  $Q$  записывалось в следующем виде:

$$Q = q_{arc} + q_{кон} (\int dV)^{-1} - q_{изл} (\int dV)^{-1}.$$

$$q_{кон} = \int k_{кон} (T - T_{oc}) dA,$$

$$q_{изл} = \int k \cdot k_p \cdot (T^4 - T_{oc}^4) dA,$$

где  $q_{arc}$  – тепловой поток от сварочной дуги, Вт/м<sup>3</sup>;  $q_{кон}$  – потери тепла с поверхности за счет конвекции, Вт;  $q_{изл}$  – потери тепла с поверхности за счет излучения, Вт;  $k_{кон}$  – коэффициент теплообмена с внешней средой, Вт/м<sup>2</sup>·°С;  $k_p$  – коэффициент теплообмена излучением ( $k_p = 0,8$ );  $k$  – постоянная Стефана – Больцмана ( $k = 5,67 \cdot 10^4$  Вт/м<sup>2</sup>·°С);  $T_{oc}$  – температура окружающей среды ( $T_{oc} = 20$  °С).

С целью уменьшения объема вычислений и упрощения расчетов принимался ряд допущений. Теплообмен деталей с внешней средой учитывался при помощи конечных элементов, находившихся на поверхности трехмерной модели. В процессе термического анализа материалы свариваемых деталей считались однородными и изотропными. В связи с незначительным количеством теплоты, выделяющейся при термической деформации металла, по сравнению с теплом от сварочной дуги полагали, что поля напряжений и деформаций не оказывают влияния на значения температур в деталях.

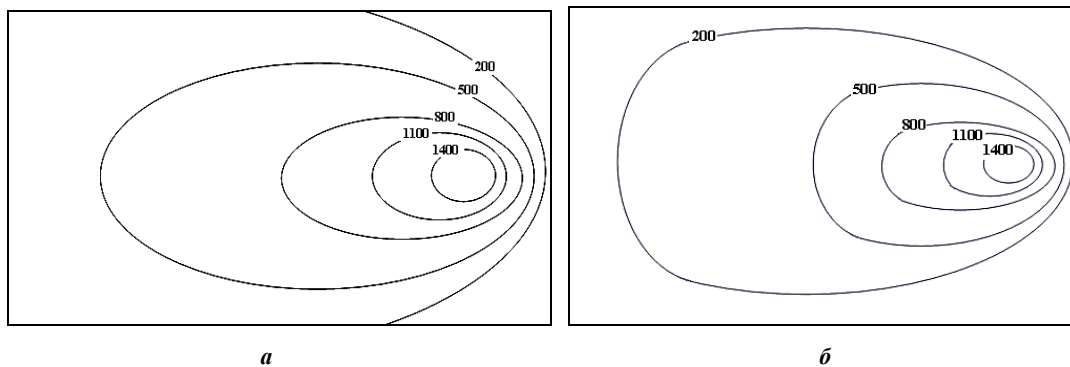


Рисунок 1. – Изотермы поверхности детали (вдоль линии перемещения источника тепла) в зависимости от вида сварки: в обычных условиях (а); с принудительным охлаждением (б)

Сравнительные результаты моделирования тепловых процессов при дуговой сварке тонколистовых заготовок из аустенитной стали приведены на рисунке 1.

Общая постановка трехмерной задачи термоупругости сводилась к определению линейных деформаций  $\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z$ , угловых деформаций  $\gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}$ , нормальных  $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$  и касательных напряжений  $\tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$  [10].

Линейные и угловые деформации соединяемых деталей при сварке определяли по формулам:

- линейные

$$\epsilon_x = \partial U / \partial x, \epsilon_y = \partial V / \partial y, \epsilon_z = \partial W / \partial z;$$

- угловые

$$\gamma_{xy} = \partial U / \partial x + \partial V / \partial x, \gamma_{yz} = \partial V / \partial z + \partial W / \partial y, \gamma_{zx} = \partial W / \partial x + \partial U / \partial z,$$

где  $U, V, W$  – перемещения точек детали в направлении координатных осей  $x, y, z$  соответственно, м.

Нормальные напряжения в соединяемых деталях определяли по формулам:

$$\sigma_x = C11 \cdot \epsilon_x + C12 \cdot \epsilon_y + C13 \cdot \epsilon_z - b \cdot T_p;$$

$$\sigma_y = C12 \cdot \epsilon_x + C22 \cdot \epsilon_y + C23 \cdot \epsilon_z - b \cdot T_p;$$

$$\sigma_z = C13 \cdot \epsilon_x + C23 \cdot \epsilon_y + C33 \cdot \epsilon_z - b \cdot T_p,$$

где  $T_p$  – температура деталей, °С.

Касательные напряжения в соединяемых деталях определяли следующим образом:

$$\tau_{xy} = C44 \cdot \gamma_{xy}, \tau_{yz} = C44 \cdot \gamma_{yz}, \tau_{zx} = C44 \cdot \gamma_{zx};$$

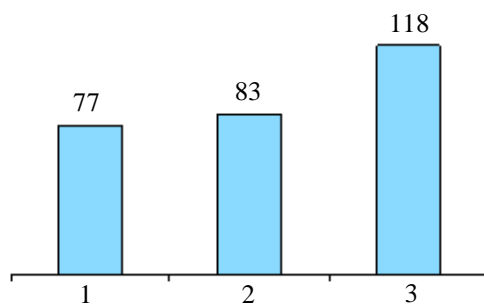
$$G = E \cdot ((1 + \nu) \cdot (1 - 2\nu))^{-1}, C11 = C22 = C33 = G \cdot (1 - \nu);$$

$$C12 = C13 = C23 = G \cdot \nu, C44 = G \cdot (1 - \nu) \cdot 0,5, b = G \cdot \alpha \cdot (1 + \nu),$$

где  $E$  – модуль Юнга, МПа;  $\nu$  – коэффициент Пуассона;  $\alpha$  – коэффициент термического расширения материала деталей; °С<sup>-1</sup>.

Таким образом, проведен несомкнутый термомеханический анализ, в процессе которого определены значения напряжений и деформаций, возникающих при выполнении дуговой сваркой стыковых соединений тонколистовых деталей из аустенитной стали.

Зависимости значений остаточных деформаций в поперечном сечении сварного шва от вида и режима сварки приведены на рисунке 2.



1 – удаление зоны охлаждения от сварочной дуги 40 мм;  
2 – удаление зоны охлаждения от сварочной дуги 30 мм; 3 – без охлаждения

Рисунок 2. – Распределение остаточных деформаций исследуемых образцов,  $\delta, \text{мм} \cdot 10^{-4}$

Полученные данные свидетельствуют о том, что в процессе дуговой сварки деталей из аустенитной стали существенное влияние на значения деформаций оказывают наличие области охлаждения и её расположение. Кроме того, полученные результаты свидетельствуют об оптимальном диапазоне значений расстояния области охлаждения от сварочной дуги. Наименьшие значения продольных остаточных деформаций 0,0077 и 0,0083 мм наблюдаются при удалении зоны охлаждения от сварочной дуги на 40 и 30 мм соответственно.

**Заключение.** В ходе исследований выполнено трехмерное моделирование дуговой сварки в среде защитного газа с принудительным охлаждением высокотемпературной области тонколистовых заготовок из аустенитной стали. Моделирование включало операции генерирования трехмерной сетки конечных



элементов, формирования и идентификации групп конечных элементов, определения теплофизических свойств материалов свариваемых деталей, назначение режима дуговой сварки заданием термомеханических начальных и граничных условий для рассчитываемой модели.

Выполнено исследование процесса дуговой сварки стыкового соединения с учетом процессов высокотемпературной релаксации напряжений. Для этого за счет решения дифференциального уравнения теплопроводности с начальными и граничными условиями для свариваемых деталей в различные моменты времени определено температурное поле, которому посредством теплофизических свойств материалов были поставлены в соответствие поля напряжений и деформаций в соединяемых деталях.

Проведенные расчеты позволили найти функциональные зависимости между параметрами режима дуговой сварки тонколистовых заготовок – положением зоны охлаждения относительно сварочной дуги – и величиной остаточных поперечных напряжений в сварном шве. Использование данных зависимостей при оптимизации режимов дуговой сварки позволяют в 1,6 раза уменьшить средние значения остаточных напряжений при изготовлении тонколистовых конструкций из аустенитной стали. Полученные данные также могут найти применение при подборе оптимальных режимов дуговой сварки тонколистовых заготовок с целью уменьшения деформаций при производстве различных оболочковых конструкций.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Технология электрической сварки металлов и сплавов плавлением ; под ред. Б.Е. Патона. – М. : Машиностроение, 1974. – 768 с.
2. Винокуров, В.А. Теория сварочных напряжений и деформаций / В.А. Винокуров. – М. : Машиностроение, 1984. – 280 с.
3. Сагалевич, В.М. Методы устранения сварочных деформаций и напряжений / В.М. Сагалевич. – М. : Машиностроение, 1974. – 248 с.
4. Parmar, K.S. Welding engineering and Technology / K.S. Parmar. – Khanna Publishers, 2005. – 270 p.
5. Feng, Z. Processes and Mechanisms of Welding Residual Stress and Distortion / Z. Feng. – Woodhead Publishers, 2005. – 343 p.
6. Цяо, Г. Бездеформационная сварка с использованием эффектов термического растяжения для соединения материалов малой толщины / Г. Цяо // Автоматическая сварка. – 2006. – № 12. – С. 3–13.
7. Пантелеенко, Ф.И. Снижение поверхностных деформаций путем термической обработки в процессе стыковой сварки / Ф.И. Пантелеенко, А. Хейдари Монфаред // Вестник Полоцкого государственного университета. Сер. В, Промышленность. Прикладные науки. – 2011. – № 3. – С. 19–26.
8. Goldak, J.A. Computational Welding Mechanics / J.A. Goldak, M. Akhlaghi. – Springer, 2005. – 321 p.
9. Шабров, Н.Н. Метод конечных элементов в расчетах деталей тепловых двигателей / Н.Н. Шабров. – Л. : Машиностроение, 1979. – 212 с.
10. Тимошенко, С.П. Теория упругости / С.П. Тимошенко, Д. Гудьер. – М. : Наука, 1979. – 560 с.

Поступила 18.01.2018

#### DECREASING DEFORMATION OF WELDING JOINTS

*F. PANTELEENKO, A. SHUMAV*

*Some ways to decrease the residual deformation of welding joints are considered. It was performed the researches to decrease the lateral residual deformation of welding joints accomplished by argon welding. It was proposed to decrease the lateral residual deformation of welding joints by using of hard carbon dioxide to reduce the area of metal heating and also by selecting of optimal welding conditions. It was found the values of lateral deformation of welding joints accomplished by argon welding with using of hard carbon dioxide as well as under usual conditions. It was evaluated the functional connections between welding conditions and lateral deformation, which allowed to calculated the optimal welding conditions to supply the minimal residual deformation. It was found that the use of hard carbon dioxide in the course of arc welding affords decreasing of lateral residual deformation of welding joints in 1,6 time in comparison with the arc welding without cooling.*

**Keywords:** arc welding, welding joint, residual deformation, optimal conditions, decreasing deformation.

УДК 656.13.08

### АУДИТ ДОРОЖНОГО ДВИЖЕНИЯ – ИНСТРУМЕНТ ПОВЫШЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ДВИЖЕНИЯ

*д-р техн. наук, доц. Д.В. КАПСКИЙ; д-р техн. наук, проф. П.А. ПЕГИН;  
д-р техн. наук, проф. А.К. ГОЛОВНИЧ  
(Белорусский национальный технический университет, Минск);  
д-р техн. наук, проф. В.П. ИВАНОВ  
(Полоцкий государственный университет)*

*Рассмотрены вопросы проведения аудита безопасности дорожного движения. Освещены основные направления, его цель и задачи в зависимости от стадии проектирования либо эксплуатации объекта. Представлен пример проведения аудита на одной из улиц города Минска. Разработаны рекомендации по повышению безопасности дорожного движения на отдельных участках исследуемой магистрали. Приведены рекомендации по разработке технического кодекса установившейся практики по проведению аудита безопасности дорожного движения проектных решений и на стадии эксплуатации транспортных объектов в Республике Беларусь.*

**Ключевые слова:** дорожное движение, качество, безопасность, аудит, организация дорожного движения, эффективность.

**Введение.** Аварийность подразделяется на фоновую и очаговую [1–4]. Около 30% всех аварий относится к фоновой аварийности. Анализ фоновой аварийности позволяет ответить на вопрос, когда заканчивается наработка на отказ в системе «водитель – автомобиль – дорога – среда движения» (ВАДС). Фоновые аварии с равной вероятностью могут произойти в любое время на любом участке улично-дорожной сети [2; 4].

Анализируя очаговую аварийность, которая сосредоточена в отдельных строго ограниченных очагах, можно ответить на вопрос, где происходит отказ в системе ВАДС. Основной причиной аварий в загородных очагах является несоответствующее качество дороги или ее состояния. Основная причина аварий в городских очагах – неудовлетворительная организация дорожного движения [2; 4]. На долю очаговой городской аварийности приходится свыше 75% городских аварий, или около 50% всех аварий, происходящих в стране [3; 4]. В таблице 1 приведены данные об аварийности в Республике Беларусь за 1988–2016 годы.

Таблица 1. – Аварийность на автомобильных дорогах Беларуси [5–8]

Год	Количество ДТП	Количество ДТП с пострадавшими	Число раненых	Число погибших
1988	–	7185	7430	–
1990	–	9311	9308	–
1995	–	7268	7457	1594
2000	–	6410	6494	1594
2005	74762	7717	8047	1673
2007	74210	7501	7990	1518
2008	82453	7238	7570	1564
2009	92553	6738	7198	1322
2010	110957	6363	6832	1190
2011	112245	5897	6334	1200
2012	111089	5187	5569	1039
2013	107795	4730	5033	894
2014	96234	4550	4854	757
2015	91367	4151	4424	664
2016	93228	3654	3923	588

*Примечание.* Общее число ДТП является заниженным, так как, например, в 2016 году более 30 тысяч аварий урегулировано страховыми организациями напрямую без вызова ГАИ [9].

Прямые потери от аварийности, рассчитанные по выплатам обязательного страхования, составляют менее 0,1% от ВВП Республики Беларусь [9; 10]. Борьба с аварийностью в городских очагах ведется в основном методами организации дорожного движения и отличается оперативностью, высокой эффективностью и низкой капиталоемкостью. Поэтому в 2010 году Рабочая группа по автомобильному транспорту КВТ ЕЭК ООН\* приняла решение по вопросам проведения аудита безопасности дорожного движения [11].

**Методология аудита безопасности.** Аудит безопасности дорожного движения – метод контроля, применяемый совместно с мониторингом дорожного движения. Проводится независимой командой экспертов на разных стадиях технологической готовности продукта дорожной отрасли – дороги (или её участка) – с целью как можно более раннего выявления и заблаговременного устранения возможных причин ДТП на стадии проектирования, реконструкции или ремонта дороги, при ее эксплуатации участниками дорожного движения. Основание для проведения аудита и алгоритмы соответствующих действий должны содержаться в соответствующем Техническом кодексе установившейся практики по проведению аудита безопасности дорожного движения – основном инструменте управления дорожной безопасностью. Аудит безопасности следует рассматривать как систему управления качеством (безопасностью как комплексным критерием в соответствии с [12]) для технологического цикла производства такого продукта, как «автомобильная дорога общего пользования».

Аудит помогает команде инженеров ввести в проект решения, гарантирующие безопасность движения, которые изначально не были предусмотрены. Даже первый аудит, проведенный на ранней стадии развития проекта (планирование и проектирование), экономит ресурсы, устраняя потенциальные риски аварийности, не позволяя им стать причиной реальных ДТП. Поэтому важной особенностью аудита является достижение наибольшего эффекта при его применении на самых ранних стадиях технологического цикла развития дороги – при планировании и проектировании, в отличие от корректировок на более поздних технологических стадиях, когда дорога уже строится или эксплуатируется. В этих случаях внесение исправлений потребует определенных затрат физического труда, что усложнит проект и вызовет тем самым его удорожание.

Концепция аудита безопасности впервые появилась в 80-е годы XX века в Великобритании на основе развития методов расследования причин ДТП и практики их устранения; последовательных изменений законодательства, которые позволяли дорожному управлению предпринимать необходимые шаги для снижения вероятности возникновения ДТП.

Аудит безопасности дорожного движения для Республики Беларусь особенно важен, поскольку учитывает статистику аварийности с материальным ущербом. Анализ статистики учетных ДТП для целей выявления участков концентрации аварийности на дорогах показывает:

- отсутствие информации о точной топографической локализации ДТП;
- отсутствие достаточной и достоверной информации об условиях, сопутствовавших ДТП;
- отсутствие объяснений причин ДТП самими участниками.

Дополнение имеющейся неполной статистики результатами практического аудита позволяет более глубоко изучить и понять причины ДТП, а значит принимать не общие, а более дифференцированные решения для снижения аварийности. Следует отметить, что статистика аварийности с материальным ущербом не ведется и не анализируется, в то время как количество таких аварий достигает 92% от общего числа совершаемых ДТП. Ввиду этого утерян мощный рычаг исследования потенциально опасной «тяжелой» аварийности, которая может проявиться после совершения определенного числа «легких», «неучетных» аварий (с материальным ущербом).

В отличие от Республики Беларусь, например, в Украине анализируются данные об аварийности с любой тяжестью последствий [4; 13].

По результатам оценки эффективности аудитов безопасности на различных стадиях развития дорожного проекта международным агентством Hamilton Associates составлена таблица, в которой собраны рекомендации по оптимальным срокам проведения того или иного вида аудита (таблица 2).

Определенных требований к аудиторам пока не существует. Однако в США и других странах аудит безопасности дорожного движения проводится как способ снижения аварийности на дорогах и представляет контроль, проводимый независимыми экспертами за дорожной деятельностью – проектирование, строительство, реконструкция, ремонт и содержание автомобильных дорог – для выявления источников дорожно-транспортных происшествий.

На основании опыта США сформулированы некоторые требования к аудиторам, представленные в таблице 3.

---

\* Комитет по внутреннему транспорту Европейской Экономической Комиссии ООН.

Таблица 2. – Оптимальные рекомендуемые сроки проведения аудита в зависимости от типа дорожного проекта

Проект	Стадия проведения аудита безопасности				
	обоснование инвестиций	эскизное проектирование (архитектурный проект)	детальное проектирование (строительный проект)	перед открытием движения	после открытия движения
1	2	3	4	5	6
Новая автомобильная дорога (большой проект)	х	х	х	Х	Х
Новая автомобильная дорога (малый проект)		Х	х	Х	х
Капитальный ремонт / реконструкция дороги (большой проект)		Х	Х	Х	
Капитальный ремонт / реконструкция дороги (малый проект)		х	х		
Совершенствование дороги / внесение улучшений (большой проект)	х	х	х	Х	х
Мероприятия по физическому сдерживанию скоростей движения			х	Х	х

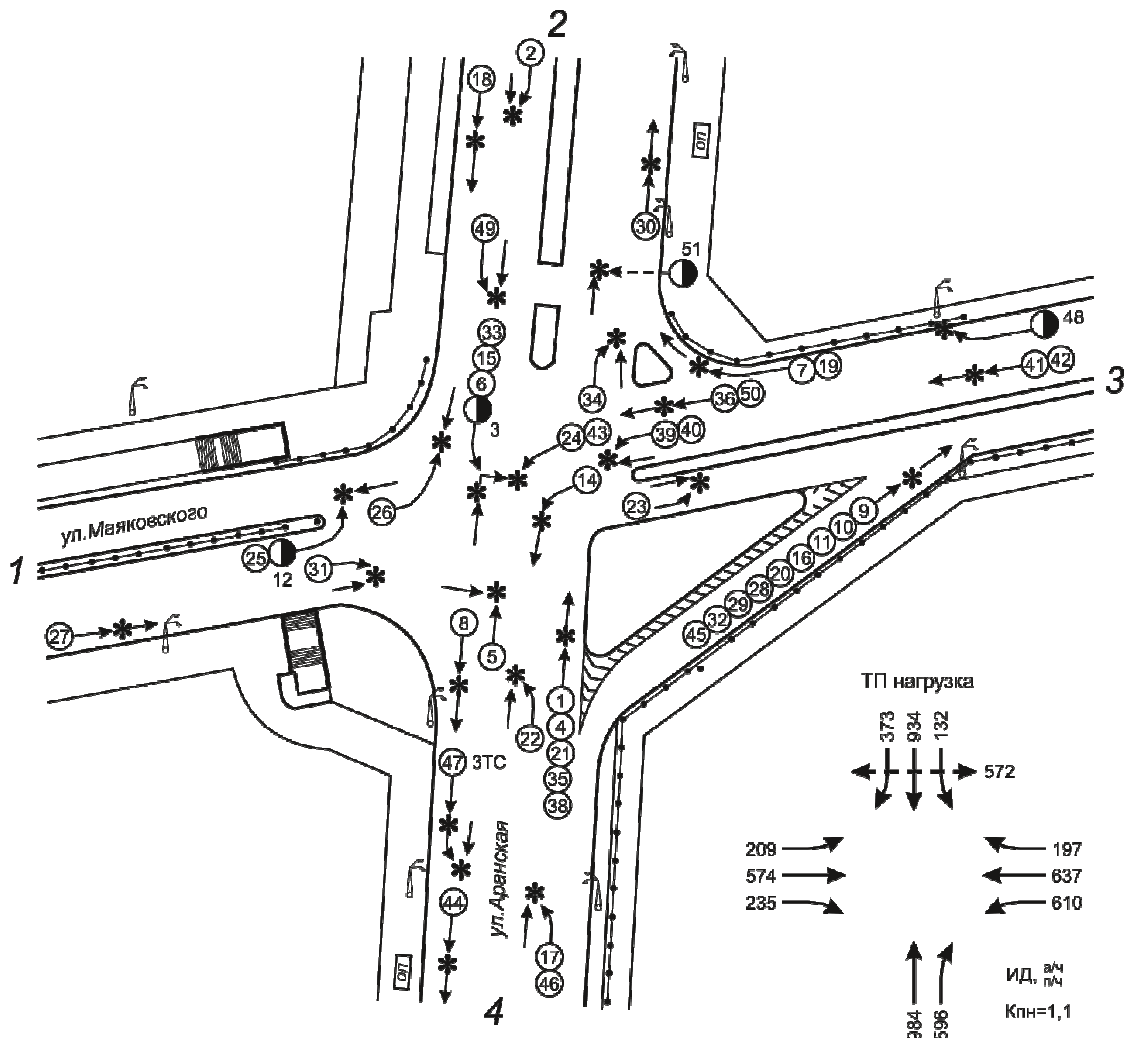
х – рекомендуется; Х – требуется.

Таблица 3. – Требования к команде аудиторов

Требования	Обоснование
Численность команды аудиторов	Одно из преимуществ аудита – синергия, возникающая в команде, поскольку знания и опыт нескольких экспертов больше, чем сумма возможностей отдельных членов команды. Коллективный результат работы всегда более значителен. Для одних проектов три человека – достаточный состав, но этой команды будет недостаточно для крупных проектов или тех, что требуют специфического опыта. Наилучшая практика – команда с минимальным составом экспертов, которые способны объединить необходимые знания и опыт для решения конкретной задачи. Команда должна состоять как минимум из трех экспертов для гарантии того, что важные вопросы не будут упущены.
Требуемые командные знания и опыт	Аудит полезен как результат вклада в процесс анализа ситуации профессионального опыта из различных областей (проектирования, эксплуатации, безопасности дорожного движения, психологии). Наилучшая практика – команда, включающая экспертов из областей, необходимых для решения конкретной задачи.
Независимость команды	Члены команды могут быть выбраны из сотрудников администрации при условии их способности действовать честно и независимо от мнения Проектировщиков. Лидер команды. В команде должен быть лидер, который хорошо знаком с процедурой аудита, способен управлять другими членами команды и налаживать контакт как с Заказчиком, так и Проектировщиком. Если аудиторы привлекаются извне, они не должны быть вовлеченными в проектирование аудируемого объекта. Критический вопрос состоит в том, могут ли аудиторы действовать независимо от Заказчика и Проектировщика при возникновении спорных вопросов, а не то, привлекаются ли они из внутренних или внешних ресурсов.
Местные представители	Команда аудиторов должна иметь полное представление о дорожной ситуации в конкретном месте. Сведения могут быть получены от представителей власти, местных организаций (дорожная полиция, ассоциации, комитеты и т.д., действующие в интересах безопасности в целом или в интересах отдельных категорий пользователей: пешеходов, велосипедистов и т.д.). При необходимости представители местной власти могут включаться в состав команды аудиторов.

Дислокация аварий, по возможности с минимальным отклонением от реальной, наносится на масштабном плане очага аварийности (рисунки 1 и 2), на котором звездочкой отмечается ориентировочное место аварии, стрелками – траектории движения конфликтующих участников. При этом сплошной стрелкой отмечается предполагаемая траектория движения транспортных средств, пунктирной – пешеходов. В конце стрелки, обозначающей предположительно виновного участника, ставится кружок, в котором (или над которым) указывается номер данной аварии по спецификации, прилагаемой к дислокации аварий. Кружком одновременно обозначается и тяжесть последствий аварии: полностью заштрихован (залит или окрашен в красный цвет) – смертельный исход; наполовину заштрихован (залит или окрашен в синий цвет) – ранение; не заштрихован – материальный ущерб. Если в аварии пострадало более одного человека, кружок делается большего размера, над ним указывается число пострадавших, при этом количество

погибших выделяется большей по размеру и более жирной цифрой. Если в аварии участвовало более двух транспортных средств или более одного пешехода, над кружком ставятся соответствующие индексы, например, «ЗТС» (3 транспортных средства) или «2ПШ» (два пешехода). При повторяющихся (однотипных или типовых) авариях к уже нанесенному кружку (с надписями) по ходу движения добавляется следующий кружок и т.д. При этом следует стремиться к тому, чтобы дислокация аварий читалась легко и четко.



Спецификация аварий

N п.п.	Дата	Время суток	N п.п.	Дата	Время суток	N п.п.	Дата	Время суток	N п.п.	Дата	Время суток
1	05.01.2007	17.10	14	28.05.2007	12.45	27	13.07.2007	08.50	40	06.10.2007	15.50
2	21.02.2007	08.45	15	22.05.2007	23.05	28	31.07.2007	14.40	41	05.10.2007	08.30
3	01.02.2007	21.10	16	22.05.2007	08.45	29	26.07.2007	14.50	42	02.10.2007	13.30
4	07.03.2007	22.40	17	12.06.2007	17.50	30	20.07.2007	17.40	43	31.10.2007	17.00
5	03.03.2007	19.00	18	07.06.2007	16.10	31	19.07.2007	17.40	44	26.10.2007	16.20
6	03.03.2007	22.45	19	04.06.2007	12.00	32	18.07.2007	17.30	45	16.10.2007	08.45
7	30.03.2007	17.30	20	27.06.2007	08.00	33	28.08.2007	07.30	46	15.11.2007	11.30
8	11.04.2007	21.15	21	26.06.2007	20.40	34	22.08.2007	08.00	47	05.11.2007	16.35
9	09.04.2007	08.30	22	25.06.2007	19.30	35	18.08.2007	21.35	48	02.12.2007	02.00
10	02.04.2007	15.00	23	23.06.2007	08.00	36	10.09.2007	20.30	49	14.12.2007	17.40
11	21.04.2007	12.45	24	22.06.2007	14.00	37	07.09.2007	11.50	50	12.12.2007	18.28
12	07.06.2007	10.05	25	16.06.2007	12.30	38	19.09.2007	08.40	51	12.12.2007	19.35
13	08.05.2007	16.00	26	15.07.2007	01.00	39	11.10.2007	12.20			

Рисунок 1. – Очаг аварийности за 2007 год на перекрестке улиц города Минска Маяковского – Могилевская – Свердлова – Аранская (фрагмент)

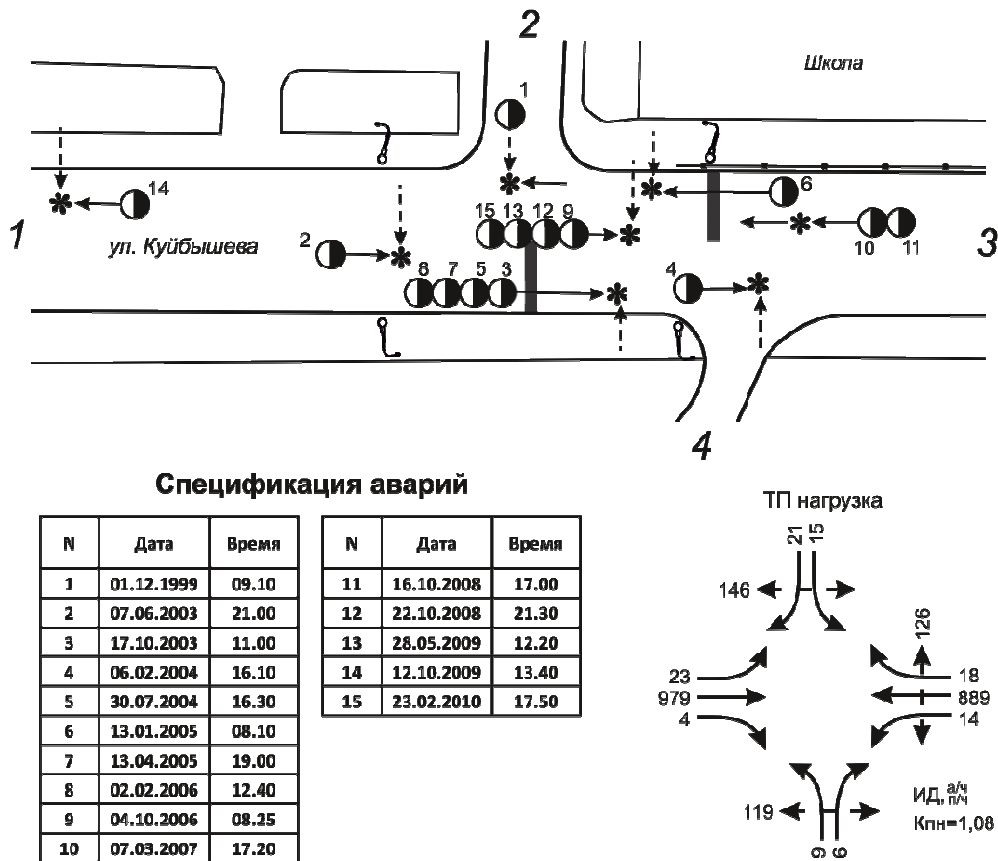


Рисунок 2. – Очаг аварийности на искусственной неровности города Минска в зоне нерегулируемого пешеходного перехода по улице Куйбышева, д. 44 (фрагмент)

Выявление очагов аварийности производится на основе топографического анализа, при котором на карту города или его отдельного района условными обозначениями наносятся все, включая так называемые «неотчетные» аварии, происходящие в течение года. При этом четко проявляются места концентрации аварий, которые и являются очагами аварийности.

**Предварительное установление причин аварийности.** После завершения оформления дислокации аварий и детального ознакомления со спецификацией, инженер приступает к предварительному установлению причин аварий. Разработанный перечень типовых причин и сопутствующих обстоятельств представлен в [14].

**Натурное обследование очага аварийности.** После установления «предварительных» причин аварий в исследуемом очаге следует провести его натурное обследование. Потребность такого обследования объясняется необходимостью подтверждения либо корректировки установленных предварительно причин, а также поиском неустановленных предварительно исследованием причин аварий и сопутствующих обстоятельств. Цена установления, подтверждения или корректировки причин аварий несоизмеримо меньше, чем тех аварий, которые будут и далее происходить из-за возможных ошибок при предварительном исследовании. Обследование проводится путем заполнения исследователем листа аудита. К листу аудита прилагаются чертежи в масштабе 1:500, а также фото- и видеоматериалы.

Необходимо учитывать то обстоятельство, что в некоторых случаях ключ к разгадке причин аварий находится не в самом очаге, а за его пределами. Например, после продолжительного запрещения обгона участки улично-дорожной сети становятся аварийными и причин аварий отыскать на них невозможно. Дело в том, что длительное запрещение обгона перед исследуемым участком создает в транспортном потоке сильное психологическое напряжение, и при первой же возможности водители буквально бросаются совершать обгоны часто в условиях повышенного или высокого риска. На пересечениях в разных уровнях, особенно на левоповоротных съездах, водители после движения на высокой скорости по магистрали не успевают адаптироваться к резко изменившимся условиям и по инерции продолжают двигаться с гораздо большей скоростью, чем это необходимо по условиям безопасности. То же самое можно сказать и о въезде в населенные (особенно малые) пункты, когда первые 200...300 м автомобили движутся с явно повышенной скоростью; о движении после хорошо скоординированной магистральной



улицы; о движении на первом светофорном объекте после въезда в город и т.д. Иными словами, если причина аварий не находится в самом очаге, то ее следует искать на стыках элементарных участков или в самой системе улично-дорожной сети.

Таким образом, можно сделать вывод, что аудит – неотъемлемая часть процесса разработки решения еще на стадиях эскизного проектирования, детального проектирования, на предэксплуатационной стадии и начальной стадии эксплуатации. Аудит отражает вопросы безопасности дорожного движения и позволяет выбрать оптимальные предложенные решения. В нем отражается вся соответствующая информация, необходимая для анализа затрат-выгод различных оцененных вариантов [15]. Так как основной причиной аварий являются недостатки в организации дорожного движения, то и повышение безопасности достигается в основном ее методами. Но поскольку эти методы некапиталоемкие (они наукоемкие) и внедряются легко и оперативно, то можно ожидать не только значимых, но и быстрых результатов по снижению аварийности.

Сегодня очаговой аварийности в городах не уделяется должного внимания. Очаги аварийности не документируются, специально не исследуются. Учитывая это обстоятельство, Управление ГАИ ГУВД Мингорисполкома выступило заказчиком работ по обследованию очагов аварийности и разработке методики исследования очаговой аварийности.

**Практическое внедрение теоретических основ аудита.** Исследования проводились Научно-исследовательским центром дорожного движения БНТУ. Обследования транспортных и пешеходных потоков, исследования условий движения проводились по методикам БНТУ [1; 3; 4]. Обработка данных о параметрах транспортных и пешеходных потоков проводилась в программном комплексе БНТУ [15; 16 и др.].

В соответствии с генеральным планом города Минска улица Радиальная – одна из построенных участков перспективного 4-го городского транспортного кольца, соединяет включенные в эту же кольцевую магистраль улицы Кабушкина и Филимонова.

Улица Радиальная проложена в зоне промышленной застройки, что определяет состав движущегося транспортного потока с высокой долей грузовых автомобилей и автопоездов (рисунок 3).



Рисунок 3. – Исследуемый участок зоны приближения к пешеходному переходу

В районе исследуемого участка улицы выявлены объекты притяжения пешеходов (рисунок 4).

Интенсивность и состав транспортных потоков определялись путем натурного эксперимента по методике Белорусского национального технического университета в рабочие дни недели. Измерения разделялись на отдельные независимые замеры по входам и направлениям. Исходные данные были обработаны в программном комплексе, в результате чего получены картограммы интенсивности и неравно-

мерности движения, диаграммы состава потока и таблицы параметров. Также было определено распределение интенсивности движения транспортных средств по каждой полосе в зоне приближения к пешеходному переходу (рисунок 5 и 6).



Рисунок 4. – Улично-дорожная сеть исследуемого участка – улица Радиальная

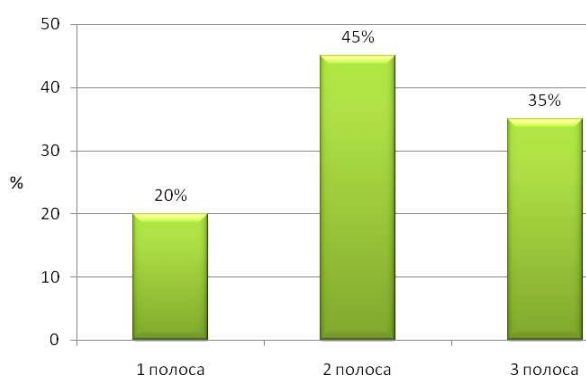


Рисунок 5. – Распределение интенсивности движения по полосам на входе А

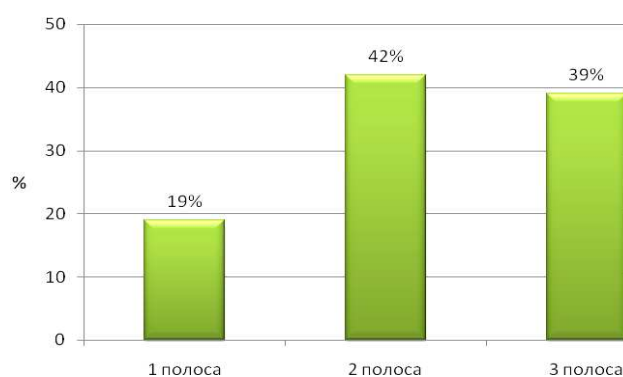


Рисунок 6. – Распределение интенсивности движения по полосам на входе С

По результатам выполненных исследований скорости движения транспортных средств выполнены расчеты и построены кривые распределения скоростей (рисунок 7). При построении экспериментальной кривой использованы верхние пределы значений скорости каждой группы.

По данным, предоставленным УГАИ ГУВД Мингорисполкома, выполнен анализ аварийности по отчетным авариям, совершенным на данном пешеходном переходе. По карточкам происшествий с материальным ущербом, которые были предоставлены ОГАИ Партизанского РУВД, выполнен анализ аварийности по неотчетным авариям. Результаты очагового анализа представлены на рисунке 8.



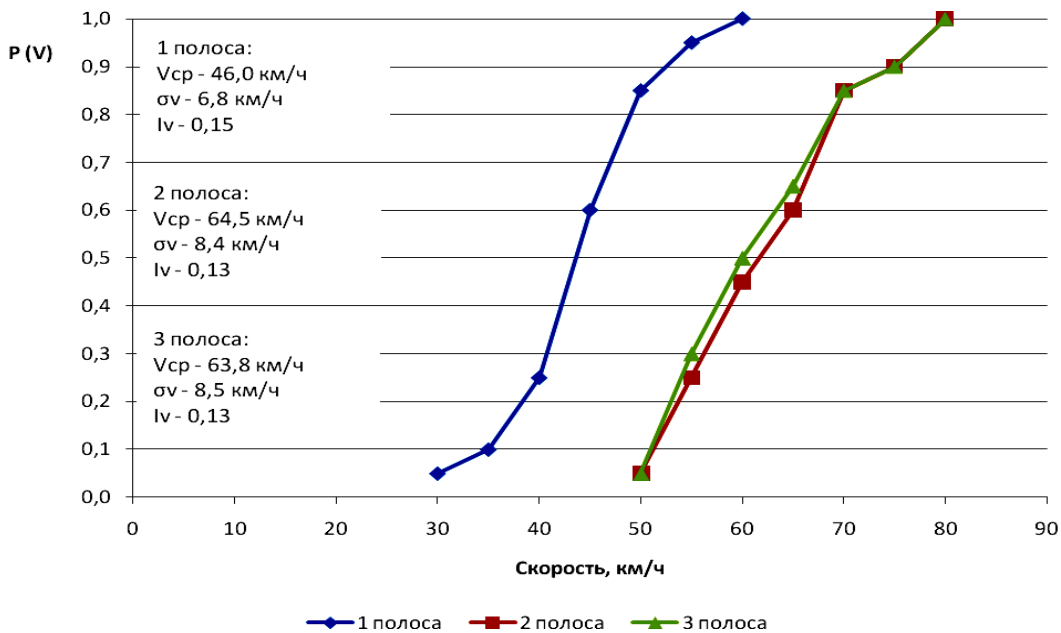


Рисунок 7 – Кумулятивные кривые распределения скоростей движения на входе А, по полосам (фрагмент)

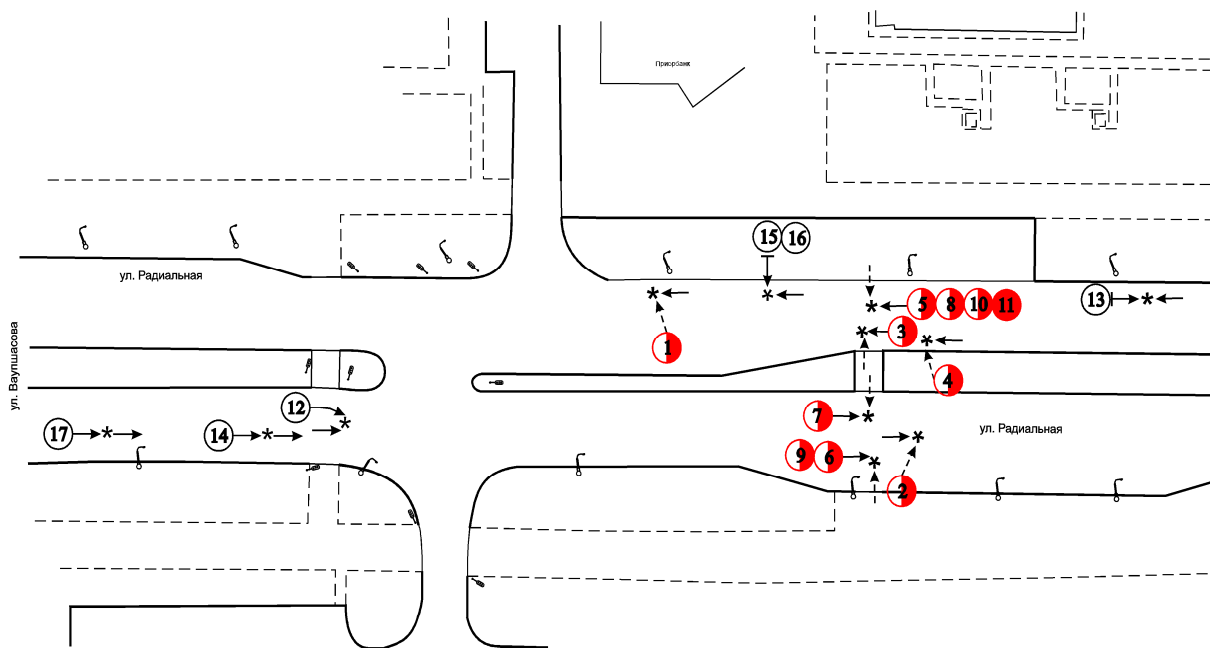


Рисунок 8. – Очаговый анализ аварийности на пешеходном переходе (фрагмент)

Из очагового анализа четко вырисовывается однотипность совершенных аварий – это наезд на пешехода. Очевидно, что в период с 2007 года увеличилась тяжесть последствий ДТП, о чем свидетельствуют десять происшествий с ранеными. По результатам экспериментальных исследований определены уровень загрузки и пропускная способность исследуемого участка улицы Радиальная.

На рисунке 9 представлена диаграмма уровня загрузки, из которой видно, что наиболее загружены, как правило, вторая и третьи полосы движения, как в прямом, так и в обратном направлении. Это связано с тем, что первая полоса используется в основном для движения маршрутных транспортных средств и на ней осуществляется несанкционированная парковка. Поэтому водители заранее выбирают маршрут движения по второй и третьей полосе. Следует отметить, что загрузка не достигает предельного значения.

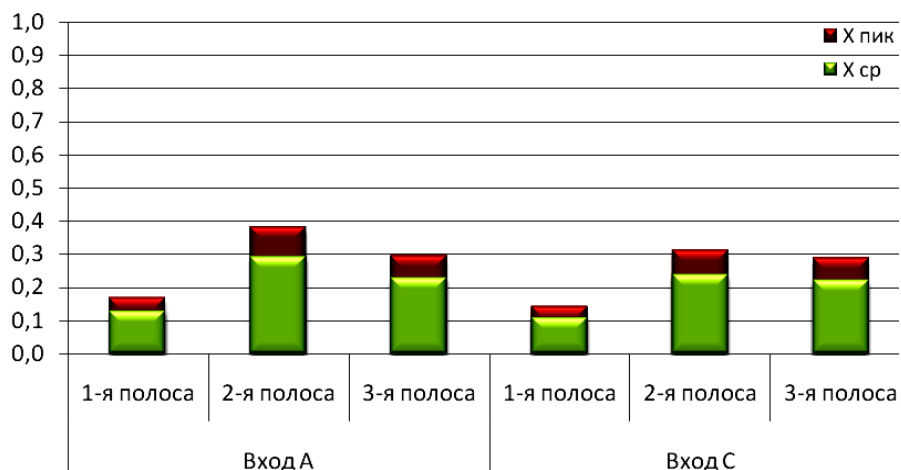


Рисунок 9. – Уровень загрузки

На рисунке 10 показаны результаты расчета потерь на нерегулируемом пешеходном переходе. Общий объем потерь на исследуемом объекте составляет около 37 тыс. у.е. в год. Аварийные потери составляют около 15 тыс. у.е. в год (41% от общего объема потерь). Выполненный расчет потерь по предлагаемым мероприятиям проиллюстрирован рисунком 11 и данными таблицы 3.

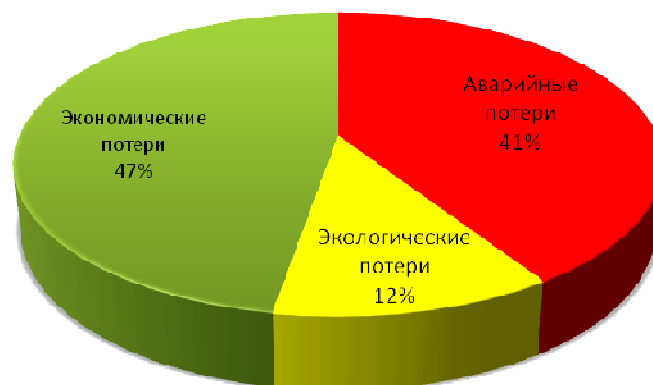
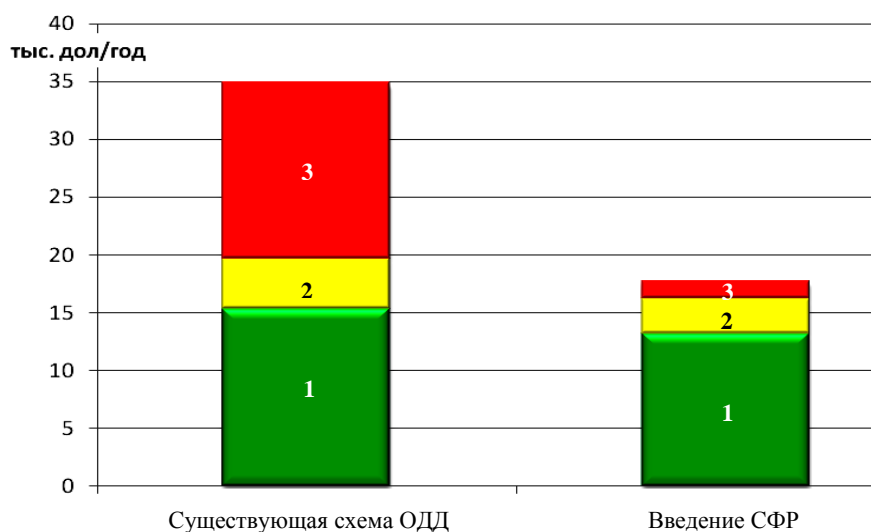


Рисунок 10. – Распределение потерь по видам на нерегулируемом пешеходном переходе



1 – экономические потери; 2 – экологические потери; 3 – аварийные потери

Рисунок 11. – Потери в дорожном движении по вариантам предлагаемых решений

Таблица 3. – Результаты сопоставления потерь в дорожном движении по вариантам предлагаемых решений

Наименование параметра	Индекс	Размерность	Существующая схема ОДД	Введение СФР
Аварийные потери	$P_a$	тыс. у.е./год	15,2	1,6
Экологические потери	$P_{экол}$	тыс. у.е./год	4,4	3,0
Экономические потери	$P_{экон}$	тыс. у.е./год	15,3	13,2
Суммарные потери	$P_{\Sigma}$	тыс. у.е./год	34,9	17,8

ОДД – организация дорожного движения; СФР – светофорное регулирование.

При введении светофорного регулирования уменьшается количество задержек и остановок транспорта перед нерегулируемым пешеходным переходом, но незначительно увеличиваются задержки на вторых стоп-линиях, что позволит снизить экономические, экологические и аварийные потери. Аварийные потери снизятся более чем на 75%, экологические – на 30% и экономические – на 14%.

В результате проведенных исследований и анализа существующих условий дорожного движения на нерегулируемом пешеходном переходе по улице Радиальная, 38 выявлено, что уровень суммарных потерь в дорожном движении на участке составляет около 35 тыс. у.е./год, в том числе потери от аварийности – около 15 тыс. у.е./год. Разработаны мероприятия планировочного и организационно-технического характера, в частности, на пешеходном переходе рекомендуется введение светофорного регулирования, которое повышает безопасность пешеходов при осуществлении перехода проезжей части. Реализация разработанных мероприятий позволит снизить уровень аварийных потерь на пешеходном переходе ориентировочно на 14 тыс. у.е./год с уменьшением числа аварий на 75%.

На рисунке 12 представлен вариант устройства разделительной полосы и выделения с ее помощью полосы для организации левого поворота на перекрестке улица К. Цеткин – улица Кальварийская. Это требует проведения определенных затратных работ, связанных с разборкой и восстановлением дорожного покрытия, устройством бортового камня, засыпкой грунта и пр. Нанесение дорожной разметки – один из способов снизить стоимость мероприятий.

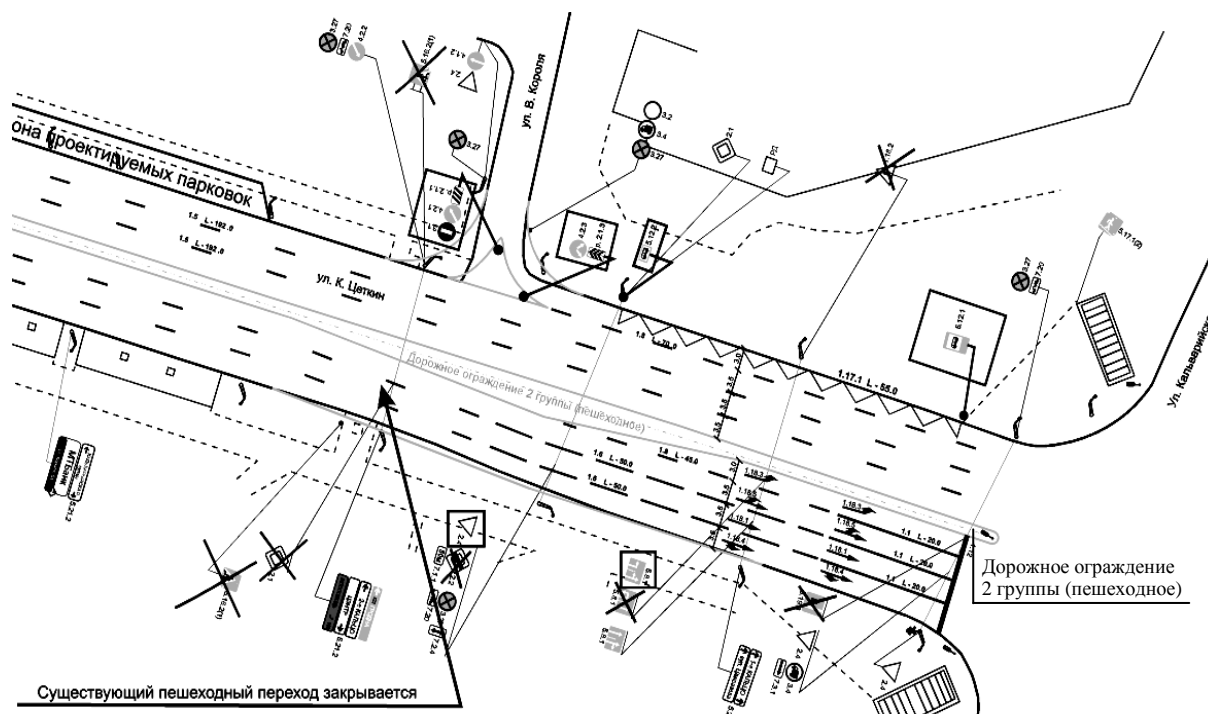
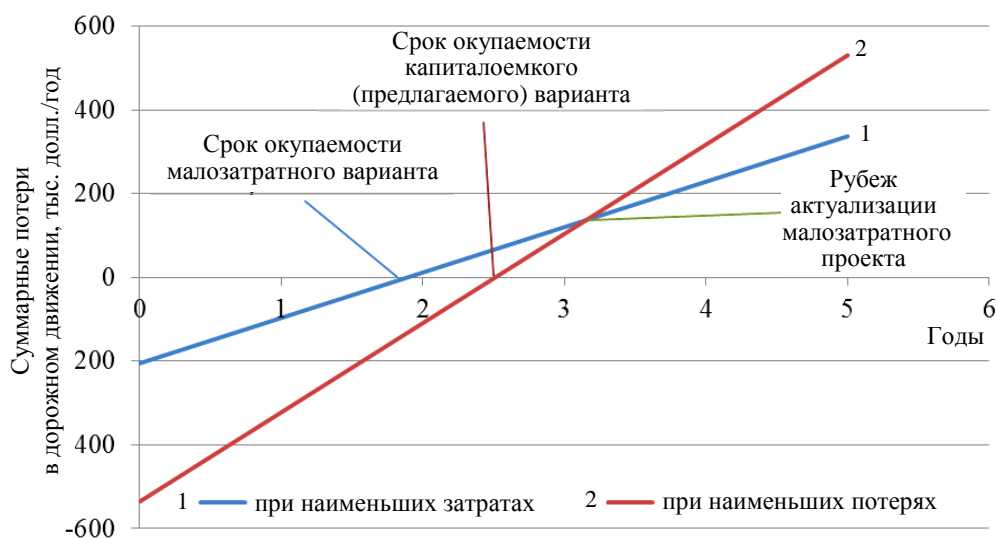


Рисунок 12. – Фрагмент варианта организации движения на улице К. Цеткин (вход на перекресток с улицы Кальварийской), город Минск

Однако, как видно из рисунка 13, малозатратные варианты после своей достаточно быстрой окупаемости теряют актуальность в связи с возрастанием транспортной нагрузки, ухудшением условий

движения в переходные погодные периоды (сезоны года) и т.д. Причем оценка затрат и выгод должна выполняться постоянно [17].



**Рисунок 13. – Сравнение целесообразности малозатратных и более капиталоемких вариантов мероприятий по повышению безопасности движения на улице К. Цеткин, город Минск**

**Заключение.** Практика показывает, что проектировщикам требуется большее осознание ответственности за результаты своей работы, поскольку дефекты проектирования оплачиваются жизнями и здоровьем пользователей дорожной сети. К сожалению, сжатые сроки проектирования и формальный типовый подход к решению задач влечет за собой неустанный рост аварийности.

Именно на стадии проектирования закладывается основа низкой безопасности дорог. Такие просчеты могут быть устранены путем проведения аудита безопасности дорожного движения, который позволит устранить дефекты, допущенные еще на стадии проектирования.

При проведении аудита анализу подвергается весь комплекс характеристик и свойств дорожного движения, в том числе дорожное обустройство, которое может провоцировать участников дорожного движения на ошибки и нарушения, повышая риски ДТП.

Путем проведения аудита безопасности, оперируя экспериментально полученными или прогнозными данными о параметрах транспортной нагрузки, режимах и условиях движения, объектах тяготения транспортных и пешеходных потоков, возможно моделировать безопасное поведение участников дорожного движения, предлагая к реализации некапиталоемкие мероприятия, предупреждающие совершение ошибок и снижающие тяжесть их последствий, если ошибки все же совершены и ДТП произошло.

Таким образом, результат аудита – повышение безопасности дорожного движения для всех категорий участников дорожного движения путем снижения вероятности совершения ими ошибок на дороге.

Реализация вышеизложенных предложений путем разработки соответствующего Технического кодекса установившейся практики позволит повысить безопасность движения в Республике Беларусь.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Врубель, Ю.А. Организация дорожного движения : в 2-х ч. / Ю.А. Врубель. – Минск : Белорус. фонд безопасности дорожного движения, 1996. – 634 с.
2. Врубель, Ю.А. Потери в дорожном движении / Ю.А. Врубель. – Минск : БНТУ, 2003. – 380 с.
3. Врубель, Ю.А. Определение потерь в дорожном движении / Ю.А. Врубель, Д.В. Капский, Е.Н. Кот. – Минск : БНТУ, 2006. – 252 с.
4. Капский, Д.В. Прогнозирование аварийности в дорожном движении / Д.В. Капский. – Минск : БНТУ, 2008. – 243 с.
5. Состояние безопасности дорожного движения в Республике Беларусь в 1999–2008 годах и наметившиеся тенденции : аналит. сб. / сост. : В.В. Бульбенков, А.А. Сушко, О.Г. Ливанский ; под общ. ред. А.Н. Кулешова. – Минск : Полиграф. Центр МВД Респ. Беларусь, 2009. – 144 с.

6. Сведения о состоянии дорожно-транспортной аварийности в Республике Беларусь в 2010 году : аналит. сб. / сост. : В.В. Бульбенков, О.Г. Ливанский ; под общ. ред. Е.Е. Полудня. – Минск : МВД Респ. Беларусь, 2011. – 89 с.
7. Сведения о состоянии дорожно-транспортной аварийности в Республике Беларусь в 2011 году : аналит. сб. / сост. : В.В. Бульбенков, О.Г. Ливанский ; под общ. ред. Н.А. Мельченко. – Минск : Полиграф. Центр МВД Респ. Беларусь, 2012. – 89 с.
8. Сведения о состоянии дорожно-транспортной аварийности в Республике Беларусь в 2013 году : аналит. сб. / сост.: О.Г. Ливанский ; под общ. ред. Н.А. Мельченко. – Минск : Полиграф. Центр МВД Респ. Беларусь, 2014. – 89 с.
9. Основные показатели работы по проведению обязательного страхования гражданской ответственности владельцев транспортных средств в Республике Беларусь за 2016 год : аналит. сб. / сост. : С.В. Рабецкий [и др.] ; под общ. ред. А.П. Авсейко. – 15-е изд. – Минск : ББТС, 2017. – 76 с.
10. За 2013 год ВВП в Беларуси вырос на 0,9% при годовом прогнозе 8,5% [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://belapan.com/archive/2014/01/21/675884/>.
11. Инфраструктура автомобильного транспорта – Европейское соглашение о международных автомагистралях (СМА): рассмотрение новых предложений по поправкам к СМА : докл. / Рабочая группа по автомобильному транспорту // Сто пятая сессия, Женева, 29 сентября – 1 октября 2010 г. / Организация Объединенных Наций ; Европейская экономическая комиссия ; Комитет по внутреннему транспорту, 2010. – 13 с.
12. Концепция обеспечения безопасности дорожного движения в Республике Беларусь : утв. постановлением Совета Министров Респ. Беларусь 14 июня 2006 г. № 757 // КонсультантПлюс. Беларусь / ООО «ЮрСпектр», Нац. центр правовой информ. Респ. Беларусь. – Минск, 2006.
13. Бондарь, Т.В. Аварийность на дорогах Украины / Т.В. Бондарь, В.К. Вырожемский // Материалы V Междунар. науч.-техн. конф. Т. 1. – Минск : БНТУ, 2007. – С. 546–554.
14. Разработка методики снижения очаговой аварийности в населенных пунктах [Текст] : отчет о НИР / Белорус. нац. техн. ун-т ; рук. Д.В. Капский ; исполн.: Е.Н. Кот, Ю.А. Врубель [и др.]. – Минск, 2009. – 114 с. – № ГБ 08-34.
15. RTF-Road traffic flows : свидетельство о регистрации компьютерной программы № 222 / Д.В. Капский, Д.В. Мозалевский, М.К. Мирошник, А.В. Коржова, В.Н. Кузьменко, А.С. Полховская, Е.Н. Костюкович. – № С20100112. – Оpubл. 17.09.2010 / Нац. центр интеллектуал. собственности.
16. ОптиМКа (OptiMKa) : свидетельство о регистрации компьютерной программы № 279 / Д.В. Капский, В.В. Мочалов. – № С20100156. – Оpubл. 18.01.2011 / Нац. центр интеллектуальной собственности.
17. Elvik, R. Cost-benefit analysis of road safety measures: applicability and controversies / R. Elvik // Accident Analysis and Prevention. – 2001. – Vol. 33. – P. 9–17.

Поступила 15.02.2018

## AUDIT OF THE ROAD – A TOOL TO IMPROVE SAFE TRAFFIC NEWS

*D. CAPSKI, P. PAGIN, A. GOLOVNITSCH, V. IVANOV*

*The issues of road safety audit are considered. The main directions, its purpose and tasks depending on the stage of design or operation of the object are highlighted. An example of audit on one of the streets of Minsk is considered. Recommendations for improving road safety in some parts of the studied highway are developed. The recommendations for the development of a technical code of established practice for the audit of road safety solutions and at the stage of operation of transport facilities in the Republic of Belarus.*

**Keywords:** road traffic, quality, safety, audit, traffic management, efficiency.

УДК 621.434-242.004.67

**ВОССТАНОВЛЕНИЕ ВКЛАДЫШЕЙ КОЛЕНЧАТОГО ВАЛА**

*канд. техн. наук, доц. Т.В. ВИГЕРИНА;  
канд. техн. наук, доц. В.А. ФРУЦКИЙ; В.В. КОСТРИЦКИЙ  
(Полоцкий государственный университет)*

*Рассмотрен процесс восстановления вкладышей коленчатого вала. Восстановление проводится химическими методами в несколько этапов. Проанализированы различные варианты покрытий, в частности покрытия, общая толщина которых составляет 25 мкм, причем толщина рассматриваемого подслоя – 125 мкм. Свойства покрытий различаются по антифрикционным показателям трибосопряжения. Сделаны выводы, что изучаемые покрытия являются гетерогенными и многокомпонентными; в них присутствуют как декоративные, так и прирабочные слои; толщины слоев имеют приблизительно одинаковые значения.*

**Ключевые слова:** *износостойкость, вкладыши подшипника, коленчатый вал, восстановление, гальванопокрытие, приспособление для растачивания.*

**Введение.** Восстановление изношенных и поврежденных деталей – важный резерв экономии трудовых и материальных ресурсов. Так, например, при производстве деталей к автомобилям расходы на материалы и изготовление заготовок (отливок, поковок, штамповок) достигают 70...75% от их стоимости. В то же время эти затраты при восстановлении деталей в зависимости от способа восстановления составляют 6...8%, так как заготовкой служит сама деталь, причем обрабатываются только те поверхности, которые имеют дефект. Парк эксплуатируемого оборудования и автомобилей сильно устарел и изношен. Так, по данным Белгоскомстата, только парк эксплуатируемых автомобилей Витебской области имеет износ 60 и более процентов, отдельные машины работают по 20...25 лет, следовательно, существует острая необходимость ремонта. В связи с нехваткой металла всё более пристальное внимание обращают на ремонт и восстановление деталей и узлов автомобилей с привлечением собственных восстановительных производств [1].

Создание технологии восстановления вкладышей коленчатых валов большегрузных автомобилей, задействовав резервы собственного восстановительного производства, в современных условиях актуально и является целью представляемого исследования.

**Условия и методы исследования.** Проанализировав объекты-аналоги, наиболее близким и доступным по возможностям моделирования является устройство для проведения трибологических испытаний, применяемое в машине трения МИ-ИМ типа «Амслер». Однако известное устройство характеризуется недостатком – отсутствие возможности изменения цикличности прилагаемых нагрузок, что приводит к недостаточной адекватности моделирования процессов истирания и низкой степени достоверности результатов испытаний. Кроме того, отсутствие возможности проведения испытаний с нагрузками на пару трения в области 0...170 Н влечет ограничения в используемых материалах и сужает диапазон проведения испытаний.

Для моделирования условий работы трибопар с переменными нагрузками за основу были приняты режимы работы подшипников скольжения, которые задействованы в большом количестве механизмов кривошипно-шатунного типа, в том числе и в двигателях внутреннего сгорания.

Для удовлетворения требований, предъявляемых к модели трибоузла, разработано специальное приспособление, которое содержит динамический нагружатель в виде эксцентрикового вала с возможным различным рабочим профилем, установленный контактно и соосно с контртелом, выполненным в виде сектора втулки и закрепленным в зажимном узле, и пружину, соединенную с контртелом посредством кинематической связи.

Для моделирования реальных условий работы проведена доработка машины трения СМЦ-2, стандартно применяемой для проведения исследований по износостойкости материалов [2; 3]. В качестве образцов вала применяли диски, вырезанные из коленчатого вала. В качестве контртела использовали серийные восстанавливаемые втулки, из которых вырезали сегмент размером 12×12 мм и закрепляли его в специальном приспособлении. Диски, имитирующие валы, изготавливали с эксцентриситетом и применяли приспособление для возможности секторного нагружения вала. Максимально допустимое давление на узел скольжения определяли по условию прочности материала вкладыша. Расчет нагрузок на пару «вал – вкладыш» проводился по контурным давлениям.

**Результаты исследования и их обсуждение.** Процесс восстановления вкладышей коленчатого вала (охватывающий 45...55% деталей ремонтного фонда), по оценкам [4–6], содержит очистку, дефектацию, растачивание, нанесение гальванических покрытий, контроль, маркировку и упаковку.

Очистку деталей производили в течение 3 мин в растворе Лабомида-203 (20...30 г/л) при температуре 60...80 °С. Дефектацию осуществляли путем осмотра и измерения толщины детали на приспособлении. Диаметральный размер вкладыша в свободном состоянии в направлении торцов должен превышать номинальный размер на 0,5...1,0 мм. В работе рассмотрены два варианта процесса восстановления вкладышей в зависимости от значения их износа [7; 8].

При износе антифрикционного слоя до 0,03 мм вкладыши растачивают, наносят приработочное трехкомпонентное покрытие толщиной 25 мкм, а затем декоративное покрытие толщиной 2...3 мкм. Приработочное покрытие состоит из олова (8...12%), меди (2...3%) и свинца (остальное). Декоративное покрытие состоит из олова и свинца, содержание олова составляет 8...10%.

При этом на этапе интенсивной приработки вкладыши, восстановленные по *методике № 1*, показали значения износа, в 2,5 раза превышающие базовый вариант. Затем значения износа резко снижаются и к моменту окончания цикла приработки абсолютные значения износа становятся меньше износа нового вкладыша. По нашему мнению, это может быть связано на первом этапе с недостаточной несущей способностью приработочного покрытия, которое не может демпфировать пиковые нагрузки, что приводит к интенсивному изнашиванию вкладыша в целом и преобладанию пластических деформаций режущего типа. Затем частицы свинца, олова, меди (в основном) перераспределяются по рабочей поверхности вкладыша и играют роль антифрикционных структур, при этом в качестве армирующего каркаса выступает структура основного металла. Это косвенно отражается в уменьшении суммарной потери веса на этапе установившегося износа. В связи с присутствием меди на рабочей поверхности вкладыша не исключена возможность переноса ее частиц на рабочую поверхность вала, что ведет к нивелированию резко выступающих неровностей поверхности и уменьшению деформационных процессов от резания. Дальнейшее снижение абсолютной разницы между износом нового вкладыша и вкладыша, восстановленного по *методике № 1*, также может свидетельствовать в пользу этого предположения. Однако в связи с тонкостью слоев и нюансами перераспределения материала данный постулат нуждается в дополнительном обосновании и дальнейших исследованиях.

При износе более 0,03 мм по рекомендациям [9; 10] производят предварительную обработку резанием, наносят слой сплава СОС-6-6 толщиной 0,125 мм и окончательно обрабатывают поверхность по *методике 2*.

Сплав СОС-6-6 состоит из олова (5,5...6,5%), сурьмы (5,5...6,5%) и свинца (остальное).

Вкладыши растачивают в приспособлении (рисунок 1) на отделочно-расточном станке мод. КК-4401.

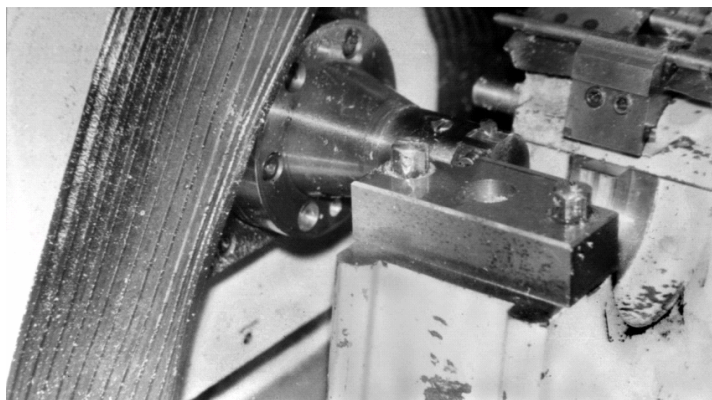


Рисунок 1. – Приспособление для растачивания вкладышей коленчатого вала на станке мод. КК-4401

Нанесение гальванических покрытий содержит следующие операции:

- электрохимическое обезжиривание на аноде и катоде без перемешивания раствора в электролите состава  $\text{Na}_2\text{PO}_4$  (20...40 г/л) и  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  (20...40 г/л) при температуре 60...70 °С, плотности тока 3,5...5,0 А/дм<sup>2</sup> в течение 3 мин;
- одноступенчатая горячая промывка в воде при температуре 70...90 °С в течение 1 мин;
- одноступенчатая холодная промывка в воде при температуре 18...25 °С в течение 1 мин;
- травление с осветлением в водном растворе состава  $\text{HNO}_3$  (420 г/л) и  $\text{HCl}$  (420 г/л) при температуре 18...25 °С в течение 1 мин;
- двухступенчатая промывка в холодной воде при температуре 18...25 °С в течение 2 мин;
- цинкатная обработка в водном растворе состава  $\text{NaOH}$  (450...525 г/л),  $\text{ZnO}$  (80...100 г/л),  $\text{FeCl}_3$  (1,0...1,2 г/л) и сегнетовой соли (10...15 г/л) при температуре 18...25 °С в течение 0,5 мин;

- повторяются операции двухступенчатой промывки в холодной воде, травления с осветлением, промывки в холодной воде, цинкатной обработки с промывкой в холодной воде;

- никелирование с перемешиванием в электролите состава  $\text{NiSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  (285...312 г/л),  $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  (40...50 г/л),  $\text{H}_3\text{BO}_3$  (40 г/л) и  $\text{H}_2\text{O}_2$  (0,15...2 г/л) при температуре 45...50 °С и катодной плотности тока 2,0...23,2 А/дм<sup>2</sup>. Толщина покрытия при этом достигает 2,5 мкм;

- двухступенчатая промывка в холодной воде при температуре 18...25 °С в течение 2 мин;

- осаждение баббита СОС-6-6 в электролите состава  $\text{Pb}(\text{BF}_4)_2$  (185 г/л),  $\text{Sn}(\text{BF}_4)_2$  (74 г/л),  $\text{Sb}(\text{BF}_4)_3$  (18,8 г/л),  $\text{HVO}_3$  (25 г/л), желатин (0,5...1,0 г/л) и резорцин (5...7 г/л) при температуре 18...25 °С, плотности тока 4 А/дм<sup>2</sup> в течение 125 мин. Толщина покрытия при этом достигает 125 мкм;

- нанесение прирабочного покрытия с центральным анодом из сплава Sn (8...10%) и Pb (остальное) в электролите состава  $\text{Pb}(\text{BF}_4)_2$  (331...472 г/л),  $\text{Sn}(\text{BF}_4)_2$  (49,2...70,4 г/л),  $\text{Cu}(\text{BF}_4)_2$  (10...15 г/л),  $\text{HBF}_4$  (70...100 г/л),  $\text{H}_3\text{BO}_3$  (30 г/л), резорцин (5...6 г/л) при температуре 18...25 °С, плотности тока 4 А/дм<sup>2</sup> в течение 250 с. Толщина покрытия при этом достигает 25 мкм;

- двухступенчатая промывка в холодной воде при температуре 18...25 °С в течение 2 мин;

- нанесение декоративного покрытия в электролите состава:  $\text{Pb}(\text{BF}_4)_2$  (185 г/л);  $\text{Sn}(\text{BF}_4)_2$  (50...74 г/л);  $\text{HVO}_3$  (25 г/л); желатин (0,5...1,0 г/л); резорцин (5...7 г/л) – при температуре 18...25 °С, плотности тока 1...2 А/дм<sup>2</sup> в течение 1...2 мин. Толщина покрытия при этом достигает 2 мкм;

- одноступенчатая холодная промывка в воде при температуре 18...25 °С в течение 1 мин;

- промывка в горячей воде при температуре 70...90 °С в течение 1 мин.

Затраты на восстановление вкладышей составляют 10...50% от стоимости новых деталей.

Анализируя поведение вкладышей, восстановленных по методике 2, выявлено уменьшение износа по сравнению с базовым вариантом и в 3,2 раза меньший износ, чем у вкладышей, восстановленных по методике № 1.

Причем при комплексном применении восстанавливающих методик общий износ заметно снижается как на этапе приработки, так и на этапе установившегося износа, что можно объяснить наличием сформированных структур, содержащих фазы, выполняющие различные функции: армирующий каркас, антифрикционные свойства, возможность избирательного переноса. При этом основной подслоем толщиной 125 мкм, очевидно, берет на себя как роль армирующего каркаса, так и роль демпфирующего элемента. Так, сурьма в соединении со свинцом и в форме оксидов увеличивает твердость и прочность основы вкладыша, выступая тем самым в качестве армирующего каркаса. В то же время сурьма, входящая в состав подслоя, совместно с оловом и медью обладает антифрикционными свойствами, что также положительно сказывается на снижении износа вкладыша в целом.

Таким образом, можно отметить возможные причины снижения износа у втулок, восстановленных по методике 2:

- в период приработки – высокая жесткость матрицы и образование вторичных структур оксидного типа на основе сурьмы и свинца, создающие армирующий каркас, способный принять и демпфировать пиковые нагрузки, что, в свою очередь, приводит к общему снижению износа в системе «вал – вкладыш». При этом на этапе приработки основное покрытие, содержащее соединения сурьмы, не входит в рабочую зону и является в этом случае подслоем, который как раз и создает армирующий каркас, работающий на всем периоде приработки и в начальные периоды установившегося износа;

- в период установившегося износа – слой, содержащий соединения сурьмы, начинает участвовать в работе трибосопряжения и помимо армирующих свойств матричного подслоя начинает выполнять функции уменьшения изнашивания, а при минимальном содержании меди, – избирательного переноса.

При наличии интерметаллических соединений с участием олова и меди создаются соединения, придающие антифрикционные свойства и способствующие возникновению избирательного переноса, способствуя тем самым снижению общего износа трибосопряжения на всем протяжении работы основного слоя в период установившегося износа.

Результаты триботехнических испытаний представлены в таблице.

Износ вкладышей при циклической нагрузке

Вкладыши	Износ мг/м <sup>3</sup> ·10 <sup>-8</sup> на пути трения L, м		
	2000	4000	6000
Новый	0,31	0,63	1,68
Восстановленный по методике 1	0,8	1,0	1,4
Восстановленный по методике 2	0,25	0,35	0,465



Как видно из приведенных результатов, при известных методиках восстановления износ втулок растет незначительно в течение всего времени испытаний, что соответствует реальным условиям истирания трибопар кривошипно-шатунного механизма. Проведенные исследования подтвердили актуальность разрабатываемого методического подхода.

Резюмируя результаты проведенного исследования, можно сделать следующие **выводы**:

- изучаемые покрытия являются гетерогенными и многокомпонентными;
- в покрытиях присутствуют как декоративные, так и приработочные слои, причем толщины слоев имеют приблизительно одинаковые значения и в сумме составляют около 30 мкм;
- вкладыши, восстановленные по методике 2, отличаются наличием рабочего слоя толщиной порядка 125 мкм, который исполняет функцию армирующего каркаса, способствует образованию антифрикционных структур, уменьшая тем самым общий износ трибосопряжения.

Предложенные процессы восстановления вкладышей коленчатого вала внедрены в ремонтное производство впервые.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Бизнес-Беларусь 2000. Каталог / сост. Ю.М. Шушкевич. – Минск : Белфакта, 1999. – 872 с.
2. Хебды, М. Справочник по триботехнике : в 3-х т. ; под общ ред. М. Хебды, А.В. Чичинадзе. – М. : Машиностроение, 1989. – Т. 2 : Смазочные материалы, техника смазки, опоры скольжения. – 416 с.
3. Gwyn, Michael A. Cost-Effective Casting Design: What Every Component Designer Should Know [Электронный ресурс] / Michael A. Gwyn ; American Metalcasting Consortium. – Режим доступа: [www.giwindustries.com](http://www.giwindustries.com).
4. Engineering and functional materials : Proceeding of the Second International Scientific Conference. – Lviv 14–16 October 1997. – Lviv, 1997.
5. Жорник, В.И. Рекомендации по ремонту и реконструкции тяжело нагруженных узлов скольжения с использованием композиционных материалов / В.И. Жорник, А.С. Калиниченко, В.Я. Кезик. – Минск : ИТК НАНБ, 2000. – 88 с.
6. Современные материалы, оборудование и технологии упрочнения и восстановления деталей машин : темат. сб. – Новополоцк : Полоц. гос. ун-т, 1999. – 370 с.
7. Гуляев, Б.Б. Синтез сплавов. Основные принципы. Выбор компонентов / Б.Б. Гуляев. – М. : Металлургия, 1984. – 158 с.
8. Ворошнин, Л.Г. Теория и практика получения защитных покрытий с помощью ХТО / Л.Г. Ворошнин, Ф.И. Пантелеенко, В.М. Константинов. – Минск : ФТИ ; Новополоцк : ПГУ, 1999. – 133 с.
9. Способ восстановления цилиндрических деталей : а. с. SU 1754397 / Ф.Я. Рудик, М.В. Зимин. – Оpubл. 15.08.1992.
10. Способ восстановления деталей : а. с. SU 1234147 / А.П. Цакун, А.М. Ищенко, М.С. Куприянов. – Оpubл. 30.05.1996.

Поступила 05.02.2018

#### RESTORATION OF THE BENT SHAFT INSERTS

*T. VIGERINA, V. FRUCKI, V. KOSTRICKI*

*The process of restoration of crankshaft inserts is considered. Recovery is carried out by chemical methods in several stages. Various variants of coatings are considered. The total thickness of the coatings is 25  $\mu\text{m}$ , while the variant under consideration has a sub-layer 125  $\mu\text{m}$  in thickness. The properties of coatings differ in the antifriction characteristics of tribocoupling. It is concluded that the studied coatings are heterogeneous and multicomponent; there are both decorative and run-in layers in them; the thicknesses of the layers have approximately the same values.*

**Keywords:** wear resistance, bearing shells, crankshaft, restoration, electroplating, boring device.

УДК 621.833

## ВЕЙВЛЕТ-ФУНКЦИИ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧ

**Ю.П. АСЛАМОВ; А.П. АСЛАМОВ; канд. техн. наук И.Г. ДАВЫДОВ; А.В. ЦУРКО**  
(Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск)

*Рассматриваются автоматические системы вибрационной диагностики, позволяющие решать задачи оценки технического состояния роторного оборудования без привлечения экспертов. Для обработки нестационарных вибрационных сигналов широкое распространение получил вейвлет-анализ. Однако качество вейвлет-анализа в большой степени зависит от выбранной базисной функции. Авторами статьи предложены базисные вейвлет-функции для диагностики зубчатых передач. Приведено их математическое обоснование и сравнительный анализ с другими базисными вейвлет-функциями. Представлены результаты тестирования базисных функций на модельных сигналах.*

**Ключевые слова:** вибродиагностика, цифровая обработка сигналов, вейвлет-преобразование, базисная функция.

**Введение.** Для оценки технического состояния роторного оборудования используются методы обработки вибросигналов в частотной и частотно-временной областях [1–4]. Широкоую практику применения в настоящее время получили спектральные методы вибрационной диагностики. В соответствии с указанным подходом каждому дефекту оборудования ставится в соответствие набор дефектных частот. Например, периодическое изменение жесткости зубьев и постоянная погрешность шага зацепления вызывают появление в вибрации зубчатой передачи колебаний на зубцовой частоте (частоте зацепления) и ее гармониках:

$$f_z = z_1 f_1 = z_2 f_2, \quad (1)$$

где  $z_1, z_2$  – соответственно число зубьев шестерен;  $f_1, f_2$  – частота вращения сопряженных колес, Гц.

По обнаруженному в спектре вибрации набору дефектных частот делается заключение о дефектном элементе оборудования, типе дефекта и степени его развития. Простота и универсальность спектральных методов стали причиной их широкого применения в задачах вибрационной диагностики.

Однако спектральные методы менее эффективны для диагностики оборудования с переменным режимом работы вследствие размытия спектра. В большинстве случаев нестационарность вибрационных сигналов в этом случае обусловлена изменяющейся во времени скоростью вращения вала. Примером подобного рода оборудования являются ветрогенераторы.

С одной стороны, решение указанной проблемы лежит в области алгоритмов уточнения частоты вращения вала и слежения за ней [5; 6]. Однако применение указанных алгоритмов не всегда достаточно для корректного использования спектральных методов, например в случаях смещения частоты вращения вала относительно его номинального значения более чем на 5...10%. С другой – удобным инструментом обработки нестационарных сигналов является вейвлет-анализ, математический аппарат которого разработан такими выдающимися учеными, как Морле, Добеши, Малла и др. [7; 8]. Хотя в практике вибрационной диагностики вейвлет-анализ еще не нашел широкого применения, данное направление, по нашему мнению, является перспективным.

Следует отметить, что существенное влияние на качество вейвлет-анализа оказывает выбор базисной функции. В частности, в работах [9; 10] показано, что выбор базисной функции, оптимизированной для указанного класса сигналов, позволяет повысить качество вейвлет-анализа и, как следствие, вибрационной диагностики в целом.

В настоящей работе авторами предложены базисные вейвлет-функции для диагностики зубчатых передач. Также приведены результаты экспериментов, проведенных на модельных вибрационных сигналах.

**Основная часть.** Линейное частотно-временное преобразование устанавливает связь сигнала с семейством волновых функций, хорошо сконцентрированных по времени и по частоте. Эти волновые функции называются частотно-временными атомами. Если рассмотреть общее семейство частотно-временных атомов  $\{\phi_\gamma\}_{\gamma \in \Gamma}$ , где  $\gamma$  может быть многоиндексным параметром, и предположить, что  $\phi_\gamma \in L^2(\mathbb{R})$  и  $\|\phi_\gamma\| = 1$ , тогда соответствующее линейное частотно-временное преобразование сигнала  $x \in L^2(\mathbb{R})$  определяется как

$$Tx(\gamma) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)\phi_\gamma^*(t) dt = \langle x, \phi_\gamma \rangle.$$

Атом Фурье с окном строится с помощью окна  $g$ , сдвинутого на  $u$  и модулированного частотой  $\omega$ :

$$\phi_\gamma(t) = g_{u,\omega}(t) = e^{i\omega t} g(t-u).$$

Вейвлет-атом – это растяжение в  $s$  раз и сдвиг на  $u$  материнского вейвлета  $\psi$ :

$$\phi_\gamma(t) = \psi_{s,u}(t) = \frac{1}{\sqrt{s}} \psi\left(\frac{t-u}{s}\right).$$

Вейвлеты и преобразование Фурье с окном имеют энергию, хорошо локализованную во времени, в то время как их преобразование Фурье сконцентрировано главным образом в ограниченном диапазоне частот.

Для анализа структуры сигналов различной длительности необходимы частотно-временные атомы с различными временными носителями. Вейвлет-преобразование раскладывает сигналы по растянутым и сдвинутым вейвлетам.

Функция  $\psi \in L^2(\mathbb{R})$  называется вейвлетом, если выполняются следующие условия:

1. Функция  $\psi(t)$  имеет нулевое среднее

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \psi(t) dt = 0. \quad (2)$$

Функция  $\psi(t)$  нормирована,  $\|\psi\| = 1$ , и имеет центр в  $t = 0$ . Часто для практических приложений оказывается необходимым, чтобы не только нулевой, но и первые  $k$  моментов были равны нулю

$$\int_{-\infty}^{+\infty} t^k \psi(t) dt = 0 \quad \text{для } 0 \leq k < p, \quad (3)$$

тогда  $\psi(t)$  ортогональна любому многочлену степени  $p - 1$ . Такой вейвлет называется вейвлетом  $k$ -го порядка. Вейвлеты, обладающие большим количеством нулевых моментов, позволяют анализировать мелкомасштабные флуктуации и особенности высокого порядка, игнорируя регулярные полиномиальные составляющие сигнала.

2. Функция  $\psi(t)$  непрерывна по всей длине, т.е. не имеет точек разрыва. В некоторых приложениях требуется непрерывная дифференцируемость [8].

3. Функция  $\psi(t)$  должна быть ограничена и локализована по времени и по частоте. Необходимым и достаточным условием является

$$\int_{-\infty}^{+\infty} |\psi(t)|^2 dt < \infty. \quad (4)$$

Локализация вейвлет-функций во времени подразумевает выполнение одного из законов убывания: а)  $t^{-m}$ , где  $m = \text{const}$ ; б) экспоненциального  $e^{-k|t|}$ , где  $k > 0$ , либо более быстро. Хорошо локализованная функция  $\psi(t)$  имеет быстрое убывание, при этом означает, что для любого показателя  $m \in \mathbb{N}$  существует константа  $C_m$  такая, что

$$\forall t \in \mathbb{R} \quad |\psi(t)| \leq \frac{C_m}{1 + |t|^m}. \quad (5)$$

4. Автомодельность базиса, что означает, что все вейвлеты семейства  $\psi_{u,s}(t)$  имеют одинаковую форму (число осцилляций), так как получаются посредством масштабирования и сдвига материнского вейвлета  $\psi(t)$ .

Вейвлет-преобразование от времени  $u$  и масштаба  $s$  есть

$$Wx(u, s) = \langle x, \psi_{u,s} \rangle = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \frac{1}{\sqrt{s}} \psi^*\left(\frac{t-u}{s}\right) dt.$$

Вейвлет-преобразование может быть переписано в виде свертки

$$Wx(u, s) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \frac{1}{\sqrt{s}} \psi^* \left( \frac{t-u}{s} \right) dt = x \cdot \tilde{\psi}_s(u), \quad (6)$$

где

$$\tilde{\psi}_s(t) = \frac{1}{\sqrt{s}} \psi^* \left( \frac{-t}{s} \right).$$

Преобразование Фурье  $\hat{\psi}_s(u)$  есть

$$\hat{\psi}_s(\omega) = \sqrt{s} \hat{\psi}(s\omega).$$

Так как  $\hat{\psi}(0) = \int_{-\infty}^{+\infty} \psi(t) dt = 0$ , то  $\hat{\psi}$  – передаточная характеристика диапазонного фильтра, т.е. вейвлет-преобразование (5) вычисляет свертку с растянутым диапазонным фильтром. Если  $\psi$  – вещественный вейвлет, тогда

$$Wx(u, s) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \frac{1}{\sqrt{s}} \psi \left( \frac{t-u}{s} \right) dt.$$

Для вейвлет-преобразования выполняется закон сохранения энергии, но вейвлет удовлетворяет условию допустимости, определяемой теоремой Кальдера, Морле и Гроссмана [7]. Пусть  $\psi \in L^2(\mathbb{R})$  – вещественная функция, такая что

$$C_\psi = \int_0^{+\infty} \frac{|\hat{\psi}(\omega)|}{\omega} d\omega < +\infty, \quad (7)$$

тогда любая  $x \in L^2(\mathbb{R})$  удовлетворяет равенству:

$$x(t) = \frac{1}{C_\psi} \int_0^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} Wx(u, s) \frac{1}{\sqrt{s}} \psi \left( \frac{t-u}{s} \right) du \frac{ds}{s^2}. \quad (8)$$

Предположение (7) называется условием допустимости для вейвлетов. Для того чтобы интеграл был конечным, требуется  $\hat{\psi}(0) = 0$ . Это объясняет, почему вейвлеты должны иметь нулевое среднее значение. Если  $\hat{\psi}(0) = 0$  и  $\hat{\psi}(\omega)$  непрерывно дифференцируема, то условие допустимости выполняется. Выражение (8) задает обратное вейвлет-преобразование.

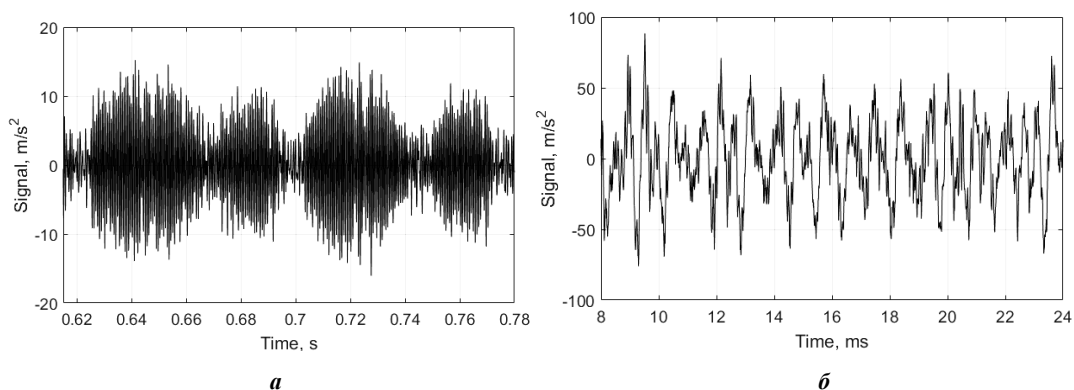
Следует отметить, что вейвлет может считаться базисной функцией  $L^2(\mathbb{R})$  только в том случае, если построенный с помощью его базис ортонормирован и обратное преобразование существует. Однако строгие доказательства полноты и ортогональности сложны и громоздки [8]. Кроме того, для практических целей часто достаточным является устойчивость и «приблизительная» ортогональность системы функций разложения. Как правило, для анализа сигналов используются такие «почти базисные» вейвлеты.

**Вейвлет-функции для диагностики зубчатых передач.** Множество научных работ посвящено разработке моделей ударных процессов в зубчатых передачах при наличии дефектов. В частности, работы [1–4] рассматривают дефекты зубчатых передач с точки зрения спектральной вибродиагностики. Например, переменная погрешность в шаге зацепления и нарушения соосности (перекосы осей валов) вызывают вибрацию на частотах вращения валов обоих колес и (или) на модуляционных частотах  $kf_1$ ,  $kf_2$  и  $mf_z \pm kf_1$ ,  $mf_z \pm kf_2$ , где  $k, m = 1, 2, \dots$ . В то же время работы [11–14] содержат результаты моделирования ударных процессов в зубчатых передачах с точки зрения механики.

Эксплуатационные дефекты зубчатой передачи можно разделить на следующие виды [1]:

- 1) абразивный износ зубчатого зацепления;
- 2) выкрашивание зубьев (питтинг) зубчатых колес;
- 3) трещины и излом зубьев зубчатых колес.

Примеры вибрационных сигналов зубчатых передачи при наличии дефектов представлены на рисунке 1.



**а** – выкрашивание нескольких зубьев шестерни; **б** – абразивный износ шестерен

**Рисунок 1. – Дефекты зубчатых передач**

Как видно из рисунка 1, сигнальные шаблоны, характеризующие наличие того или иного дефекта, можно условно разделить на два класса. К первому классу относятся амплитудно-модулированные колебания (рисунок 1, *а*). Сигналы данного класса соответствуют физическому повреждению зубьев шестерен (дефекты 2 и 3). При этом в спектральной области при таком виде дефектов присутствуют гармоники вида  $mf_z \pm nf_{1,2}, kf_{1,2}$ , где  $k, m = 1, 2, \dots, n = 0, 1, 2, \dots$ .

Представители второго класса сигнальных шаблонов близки по форме к синусоидальным колебаниям (рисунок 1, *б*). Сигналы данного класса соответствуют абразивному износу шестерен зубчатой передачи, хотя во многих случаях также характеризуют нормальное состояние зубчатой передачи при усиленной нагрузке или при наличии постоянной погрешности зацепления [1]. При этом в спектре присутствуют гармоники  $mf_z, kf_{1,2}, k, m = 1, 2, \dots$ .

Базисные функции для выявления указанных дефектов зубчатых передач должны максимально соответствовать форме описанных сигнальных шаблонов и иметь хорошую локализацию во временной и частотной областях. С этой целью были разработаны следующие базисные функции: *AMP*, *BP* и *SINP*.

Для обнаружения в сигнале амплитудно-модулированных шаблонов был разработан вейвлет *AMP* (*amplitude modulated pulse* – амплитудно-модулированный импульс), описываемый выражением:

$$\psi^{AMP}(t, \omega, FF) = s^{AM}(t, \omega, FF) \cdot g(t, \omega, FF), \tag{9}$$

где  $s^{AM}(t, \omega, FF)$  – амплитудно-модулированный сигнал,  $\omega = 2\pi f_0$  – циклическая несущая частота, рад/с;  $FF > 0$  – коэффициент формы;  $g(t, \omega, FF)$  – прямоугольная оконная функция с гауссовым затуханием по краям:

$$s^{AM}(t, \omega, FF) = \left[ 1 + \cos\left(\frac{\omega t}{FF}\right) \right] \cdot \frac{\sin(\omega t)}{2}, \tag{10}$$

$$g(t, \omega, FF) = \begin{cases} \exp\left(-k\omega^2\left(t + \frac{\omega}{4\pi FF}\right)^2\right), & t > -\frac{\omega}{4\pi FF}; \\ 1, & -\frac{\omega}{4\pi FF} \leq t \leq \frac{\omega}{4\pi FF}; \\ \exp\left(-k\omega^2\left(t - \frac{\omega}{4\pi FF}\right)^2\right), & t < \frac{\omega}{4\pi FF}, \end{cases} \tag{11}$$

где  $k$  – коэффициент затухания.

Для получения более резких фронтов оконной функции  $g(t, \omega, FF)$  выбрано значение  $k = 2$ . Выбор основан на экспериментальных исследованиях, результаты которых в рамках данной статьи не приводятся.

Для обнаружения процессов биения в вибрационных сигналах был разработан вейвлет *BP* (*beating pulse* – ударный импульс), описываемый выражением (12).

$$\psi^{BP}(t, \omega, FF) = s^B(t, \omega, FF) \cdot g(t, \omega, FF), \tag{12}$$

где  $g(t, \omega, FF)$  – оконная функция с гауссовым затуханием по краям, определяемая выражением (11);  $s^B(t, \omega, FF)$  – сигнал биений:

$$s^B(t, \omega, FF) = \cos\left(\frac{\omega t}{FF}\right) \cdot \sin(\omega t). \tag{13}$$

Следует отметить, что в качестве базисной функции для выявления амплитудно-модулированных сигнальных шаблонов также рассматривается вейвлет *MORL*:

$$\psi^{MORL}(t, \omega) = \cos(5\omega t) \exp(-\omega^2 t^2). \tag{14}$$

Для обнаружения в вибрационном сигнале синусоидальных шаблонов был разработан вейвлет *SINP* (*sin pulse*), определяемый выражением:

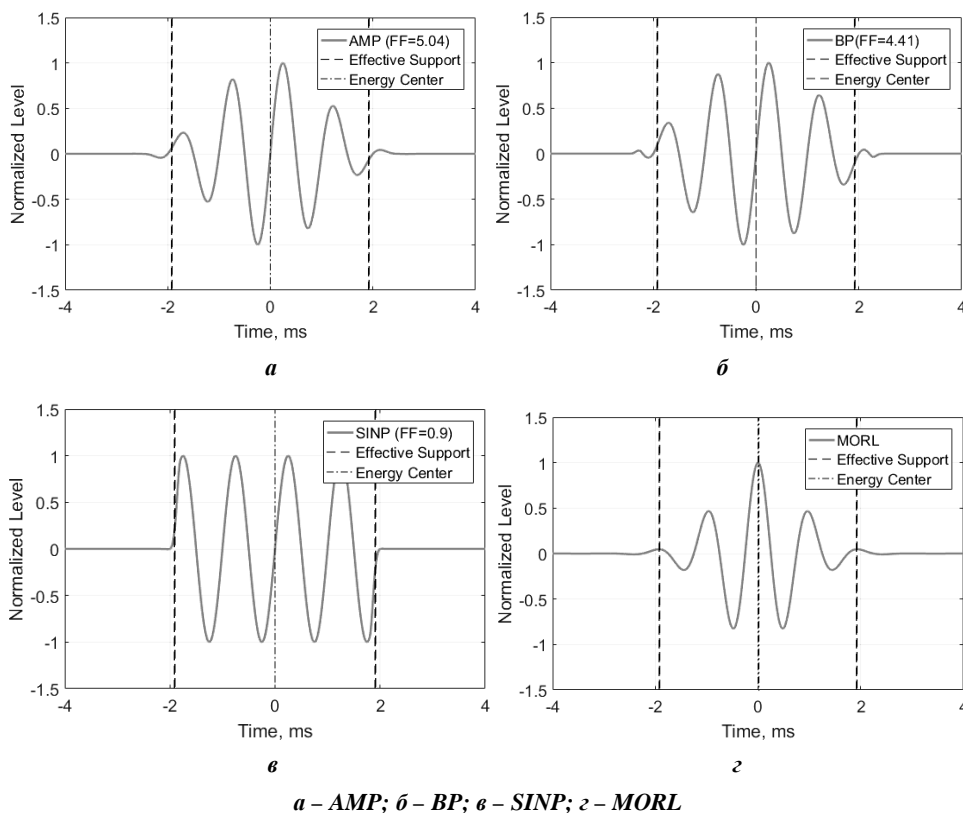
$$\psi^{SINP}(t, \omega, FF) = \sin(\omega t) \cdot g(t, \omega, FF). \tag{15}$$

Вейвлеты *AMP*, *BP*, *SINP* непрерывны по всей длине и, следовательно, интегрируемы. Локализация вейвлетов осуществляется оконной функцией  $g(t, \omega, FF)$ , поэтому  $\int_{-\infty}^{\infty} |\psi(t)|^2 dt < \infty$ . Частотная локализация обеспечивается сохранением несущей частоты.

В силу того, что сигналы  $s^{AM}(t, \omega, FF)$ ,  $s^B(t, \omega, FF)$  и  $\sin(\omega t)$  есть нечетные функции, а оконная функция  $g(t, \omega, FF)$  четная, то вейвлеты  $\psi^{AMP}(t, \omega, FF)$ ,  $\psi^{BP}(t, \omega, FF)$  и  $\psi^{SINP}(t, \omega, FF)$  также нечетные функции. Следовательно, вейвлеты *AMP*, *BP* и *SINP* обладают нулевым средним (2), поэтому для них выполняется условие допустимости (7).

Полученные функции не изменяют свою форму при изменении частоты (масштаба), поэтому построенные на их основе базисы обладают свойством автомодельности (5).

Внешний вид вейвлетов *AMP*, *BP*, *SINP* и *MORL* представлен на рисунке 2.



**a** – AMP; **б** – BP; **в** – SINP; **г** – MORL

**Рисунок 2.** – Вейвлеты для диагностики зубчатых передач

Вейвлет-функции  $AMP$ ,  $BP$  и  $SINP$  не обладают компактным носителем вследствие наличия экспоненциального закона затухания в выражении для оконной функции  $g(t, \omega, FF)$  (11). В этом случае используется термин длины эффективного носителя. Длина эффективного носителя  $\Delta T_{eff}^{\Psi}$  вейвлета  $\psi(t)$  есть интервал, на котором сосредоточена значительная часть энергии вейвлета

$$\Delta T_{eff}^{\Psi} = t_2 - t_1, \quad t_2 > t_1 \quad \Rightarrow \quad (16)$$

где  $\varepsilon \leq 0,05$  – доля энергии вне эффективного носителя;  $\|\psi\| = \left( \int_{-\infty}^{+\infty} |\psi(t)|^2 dt \right)^{1/2}$  – норма функции  $\psi(t)$ .

В силу симметричности вейвлетов  $AMP$ ,  $BP$  и  $SINP$  их энергетический центр

$$t_c = \frac{1}{\|\psi\|^2} \int_{-\infty}^{+\infty} t |\psi(t)|^2 dt$$

находится в точке  $t_{c0} = 0$  при любом значении коэффициента формы  $FF^{\Psi}$ . На рисунке 2 для каждого вейвлета пунктирной и штрихпунктирной линиями обозначены соответственно интервал эффективного носителя  $\Delta T_{eff}^{\Psi}$  и положение энергетического центра  $t_{c0}$ .

При уменьшении коэффициента формы  $FF^{\Psi}$  ниже определенного значения наблюдается сдвиг несущих частот вейвлетов  $f_0$  относительно их номинального значения. На основе экспериментальных исследований были установлены минимальные значения коэффициентов формы для каждого из используемых вейвлетов, которые соответствуют нулевому сдвигу несущей частоты:  $FF^{AMP} = 2,25$ ,  $FF^{BP} = 3,36$  и  $FF^{SINP} = 1,26$ .

Стоит отметить, что введение коэффициента формы  $FF$  в выражение для вейвлетов позволяет построить набор базисных функций с различным частотно-временным разрешением в пределах одного масштаба (частоты). Это свойство, в частности, используется для построения базиса алгоритма разреженной вейвлетной декомпозиции [15].

**Результаты и их обсуждение.** Для оценки эффективности выделения сигнальных шаблонов в вибрационном сигнале дефектной зубчатой передачи проведен сравнительный анализ четырех рассматриваемых вейвлетов на модельных сигналах.

Как упоминалось выше, в работах [11–14] модели вибрационных сигналов для нормального и дефектного состояния зубчатых передач рассматриваются сугубо с точки зрения механики и описываются кинематическими уравнениями. Для моделирования данный подход неудобен, поэтому для синтеза тестовых сигналов вместо кинематических уравнений за основу выбраны шаблоны спектров вибрации для дефектного и нормального состояния зубчатых передач [1; 2].

Для упрощения моделирования тестовые сигналы содержат информацию только об одной паре шестерен, значение частоты зацепления считается неизменной (не имитируется ее нестабильность и, как следствие, размытие спектра), также не имитируются биения вала дефектной шестерни. Поэтому получаемый модульный сигнал можно сравнить с сигналом вибрации после узкополосной фильтрации.

Для имитации вибросигналов зубчатой передачи используется сигнал вида

$$s(t, FF) = \sum_i \sum_j A_{i,j} \cdot \sin \left( 2\pi f_{zi} \left( 1 + \frac{n_{i,j}}{FF} \right) t \right), \quad (17)$$

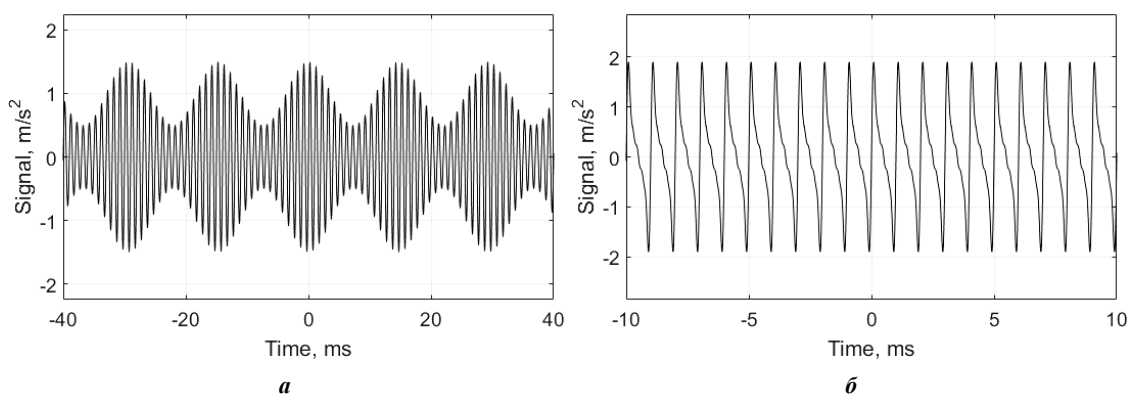
где  $f_{zi}$  –  $i$ -я гармоника зубцовой частоты (Гц),  $i \in \mathbb{N}$ ;  $j$  – порядковый номер боковых составляющих,  $j \in \mathbb{N}$ ;  $n_{i,j}$  – номер гармоники,  $n_{i,j} \in \mathbb{Z}$ ;  $A_{i,j}$  – амплитуда гармоники,  $A_{i,j} \in \mathbb{R}$ ;  $FF$  – коэффициент формы, определяющий частоту модулирующего колебания в (10), так как

$$F = f_0 / FF. \quad (18)$$

На основе (17) сформированы два класса сигналов: амплитудно-модулированных и синусоидальных (рисунок 3). Несущая частота тестовых сигналов  $f_0 = 1$  кГц, длительность реализаций  $T = 10$  с.

Для проведения сравнительного анализа длины эффективных носителей  $\Delta T_{eff}^{\Psi}$  вейвлетов  $AMP$ ,  $BP$  и  $SINP$  посредством изменения их коэффициентов формы приведены к длине эффективного носи-

теля  $\Delta T_{eff}^{MORL}$ . Были получены следующие значения коэффициентов формы для сравниваемых вейвлетов:  $FF^{AMP} = 5,04$ ,  $FF^{BP} = 4,41$  и  $FF^{SINP} = 0,90$ .



*a* – абразивный износ зубьев шестерни; *б* – повышенный зазор между шестернями

Рисунок 3. – Модельные сигналы зубчатой передачи

Каждая вейвлет-функция  $\psi(t)$  подвергается предварительной нормировке:

$$\bar{\psi}(t) = \frac{\psi(t)}{\|\psi\|}. \quad (19)$$

Сравнение вейвлетов проводится в терминах отклика  $resp(\psi, FF)$ . Под откликом  $resp(\psi, FF_i)$  вейвлета  $\psi$  на сигнал  $s(t)$  понимается

$$resp(\psi, FF_i) = \frac{\max \left[ \text{env} \left( \text{corr} \left( \bar{\psi}(t), s(t, FF_i) \right) \right) \right]}{\|s(t, FF_i) \cdot \text{rect}(t, t_{\max}, \Delta T_{eff})\|}, \quad (20)$$

где  $\text{env}(x(t))$  – огибающая по Гильберту сигнала  $x(t)$ ;  $\text{corr}(x(t), y(t)) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)y(t-\tau)d\tau$  – корреляционная функция сигналов  $x(t)$  и  $y(t)$ ;  $\bar{\psi}(t)$  – нормированная по (19) вейвлет-функция  $\psi(t)$ ;  $\text{rect}(t, t_{\max}, \Delta T_{eff})$  – прямоугольная оконная функция

$$\text{rect}(t, t_{\max}, \Delta T_{eff}^{\psi}(FF)) = \begin{cases} 1, & t_{\max} - \frac{\Delta T_{eff}}{2} \leq t \leq t_{\max} + \frac{\Delta T_{eff}}{2}, \\ 0, & \text{иначе} \end{cases}$$

$t_{\max}$  – положение максимума на огибающей корреляционной функции. В данном эксперименте длина эффективного носителя рассчитывается при остаточной доле энергии  $\varepsilon = 10^{-3}$ .

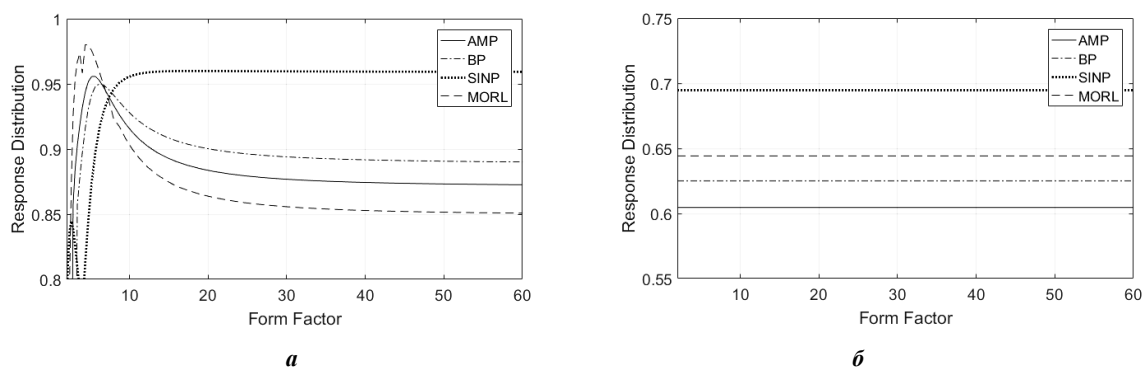
Кривые отклика вейвлетов на сформированные тестовые сигналы представлены на рисунке 4.

По результатам проведенного эксперимента (рисунок 4) из четырех рассматриваемых вейвлетов для анализа зубчатых передач можно выделить *MORL* и *SINP*, обладающие максимальным откликом на амплитудно-модулированные и синусоидальные воздействия соответственно.

В случае амплитудно-модулированных колебаний (см. рисунок 3, *a*) в диапазоне коэффициентов формы тестовых сигналов  $FF \leq 7$  отклик вейвлета *MORL* превышает отклик вейвлетов *AMP* на 7,04%, *BP* – на 3,8% и *SINP* – на 15,8% (рисунок 4, *a*). Однако для коэффициентов формы тестовых сигналов  $FF > 7$  отклик *SINP* в среднем на 7,6...15,4% превосходит отклики вейвлетов *AMP*, *BP* и *MORL*.

Наилучшим откликом во всем диапазоне коэффициентов формы на колебания, близкие по форме к синусоидальным (см. рисунок 3, *б*), обладает вейвлет *SINP* (рисунок 4, *б*). Отклик *SINP* на указанные воздействия на 7,8% больше, чем у *MORL*; на 11,13% больше, чем у *BP*, и на 14,90% больше, чем у *AMP*.





*a* – абразивный износ зубьев шестерни; *б* – повышенный зазор между зубьями шестерен

Рисунок 4. – Отклик вейвлетов на модельные сигналы

Следует отметить, что отклик вейвлетов *AMP*, *BP* и *MORL*, в отличие от *SINP*, сосредоточен в области коэффициентов формы тестовых сигналов *FF*, в пределах которой их сходство с ударными процессами максимально (рисунок 4, *a*). Поэтому с ростом продолжительности модуляционных процессов (увеличение *FF* сигналов) максимальный отклик вейвлетов будет смещаться в сторону больших  $FF^{AMP} / FF^{BP} / FF^{MORL}$ .

Следовательно, изменяя коэффициент формы вейвлетов *FF*, можно построить семейство базисных функций, результирующий отклик которого полностью покрывает шкалу коэффициентов формы *FF* тестовых сигналов. При этом отклик семейства вейвлетов *MORL* на амплитудно-модулированные колебания во всем диапазоне коэффициентов формы *FF* в среднем на 2,5...4,4% выше, чем у вейвлетов семейств *AMP*, *BP* и *SINP* (рисунок 5). Данное свойство используется при построении вейвлетного словаря для разреженной вейвлетной декомпозиции [15].

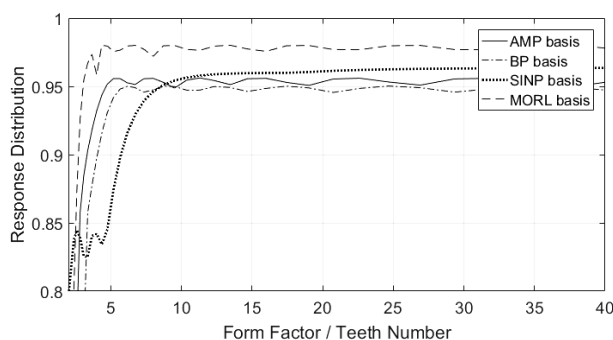


Рисунок 5. – Отклик семейств вейвлетов на амплитудно-модулированные сигналы

На основе выражений (1) и (18) можно провести условную параллель между коэффициентом формы *FF* амплитудно-модулированного сигнала (см. рисунок 3, *a*) и количеством зубьев *z* дефектной шестерни, сигнал которой имитируется. Поэтому по оси *FF* может быть отложено количество зубьев дефектной шестерни *z* (см. рисунок 5).

**Заключение.** В работе рассмотрены базисные функции для вибрационной диагностики зубчатых передач. Разработаны вейвлеты *AMP*, *BP* и *SINP*, проведено их математическое обоснование. Представлен сравнительный анализ рассматриваемых вейвлетов в терминах отклика на заданные модельные сигналы. Выявлено, что лучшим откликом на тестовые сигналы, имитирующие дефекты зубчатых передач, обладают вейвлеты *MORL* и *SINP*. Дальнейшие исследования предлагается направить на разработку базисов разреженной вейвлетной декомпозиции.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Абрамов, И.Л. Вибродиагностика энергетического оборудования : учеб. пособие по дисциплине «Диагностика в теплоэнергетике» / И.Л. Абрамов. – Кемерово, 2011. – 80 с.
2. Барков, А.В. Вибрационная диагностика машин и оборудования. Анализ вибрации : учеб. пособие / А.В. Барков, Н.А. Баркова. – СПб. : СПбГМТУ, 2004. – 156 с.

3. Баркова, Н.А. Вибрационная диагностика машин и оборудования. Расчет основных частей вибрации узлов машин, параметров измерительной аппаратуры и практическая экспертиза : учеб. пособие / Н.А. Баркова, А.А. Борисов. – СПб. : СПбГМТУ, 2004. – 156 с.
4. Костюков В.Н. Основы виброакустической диагностики и мониторинга машин : учеб. пособие / В.Н. Костюков, А.П. Науменко. – Омск : Изд-во ОмГТУ, 2011. – 360 с.
5. Eltabach, M. Rotating machine speed estimation using vibration statistical approach / M. Eltabach, G. Govaert // First World Congress on Condition Monitoring 2017 (WCCM 2017) The International Society for Condition Monitoring (ISCM), British Institute of Non-Destructive Testing.
6. Алгоритмы уточнения частоты вращения вала в задачах вибродиагностики роторного оборудования / Ю.П. Асламов [и др.] // Вестник Полоцкого государственного университета. Сер. В, Промышленность. Прикладные науки. – 2017. – № 11. – С. 51–58.
7. Mallat, S. A wavelet tour of signal processing. The sparse way / S. Mallat, Academic Press, 2009.
8. Астафьева, Н.М. Вейвлет-анализ: основы теории и примеры применения // Успехи физических наук. – Т. 166, № 11. – 1996.
9. Диагностика качества подшипников качения с применением вейвлет-анализа / И.Г. Давыдов [и др.] // Докл. БГУИР. – 2005. – № 3 (11). – С. 48–52.
10. Васюкевич, С.Ю. Технические средства защиты информации / С.Ю. Васюкевич, И.Г. Давыдов, С.А. Мигалевич : тез. докл. VIII Белорус.-рос. науч.-техн. конф., Браслав, 24–28 мая 2010. – С. 106.
11. Chaari, F. Analytical modelling of spur gear tooth crack and influence on gearmesh stiffness / F. Chaari, T. Fakhfakh, M. Haddar // European Journal of Mechanics A/Solids, 28 (2009). – P. 461–468.
12. Dong, W. Time-domain modeling and analysis of dynamic gear contact force in a wind turbine gearbox with respect to fatigue assessment / W. Dong, Y. Xing, T. Moan // Energies, 5 (2012). – P. 4350–4371.
13. Klein, R. Model Based approach for identification of gears and bearings failure modes / R. Klein, E. Rudyk, E. Masad // International Journal of Prognostics and Health Management, 2 (2011). – P. 100–109.
14. Pitting damage levels estimation for planetary gear sets based on mode simulation and grey relational analysis / C. Zhe [et al.] // Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering, 35 (2011). – P. 403–417.
15. Разреженная вейвлетная декомпозиция в задачах вибродиагностики роторного оборудования / Ю.П. Асламов [и др.] // Докл. БГУИР. – 2017. – № 8. – С. 91–98.

Поступила 29.01.2018

## WAVELET FUNCTIONS FOR GEARING DIAGNOSIS

Y. ASLAMOV, A. ASLAMOV, D. DAVYDOV, A. TSURKO

*Automatic systems of vibration-based diagnostics allowing to solve problems of estimation of a technical condition of rotary equipment without involvement of experts are considered. Wavelet analysis became widely used to process non-stationary signals. However, the quality of the wavelet analysis strongly depends on the chosen wavelet function. The authors of the article proposed basis functions intended for the gearing diagnosis. Wavelets mathematical justification and comparative analysis with other wavelets are provided. The article contains the results of testing the proposed wavelets on model signals.*

**Keywords:** vibration-based diagnostics, digital signal processing, wavelet transform, basis function.

УДК 621.787

## ПРОГРЕССИВНЫЕ КОНСТРУКЦИИ ИНСТРУМЕНТОВ ДЛЯ СОВМЕЩЕННОГО МАГНИТНО-ДИНАМИЧЕСКОГО НАКАТЫВАНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

*канд. техн. наук, доц. А.М. ДОВГАЛЕВ; И.А. ТАРАДЕЙКО;  
канд. техн. наук, доц. Н.А. ЛЕВАНОВИЧ  
(Белорусско-Российский университет, Могилев)*

*Представлены усовершенствованные конструкции инструментов для совмещенного магнитно-динамического накатывания внутренних и наружных цилиндрических поверхностей деталей машин на станках сверлильно-фрезерно-расточной и токарной групп, содержащих компактную магнитную систему на основе постоянных цилиндрических магнитов. Предложены конструкции инструментов, позволяющие исключить шаржирование поверхности деталей металлическими включениями, осуществлять (по мере необходимости) очистку кольцевой камеры и деформирующих шаров от ферромагнитных частиц, синхронизировать скорости вращения деформирующих шаров и магнитной системы, минимизировать износ рабочих поверхностей кольцевой камеры. В результате усовершенствования инструментов повышаются качественные характеристики обработанной поверхности, эффективность процесса упрочнения, увеличивается срок их эксплуатации.*

**Ключевые слова:** *совмещенное накатывание, магнитная система, деформирующие шары, упрочнение, вращающееся магнитное поле, модификация поверхностного слоя.*

**Введение.** В настоящее время разработано достаточно большое количество методов поверхностного упрочнения деталей машин. В машиностроении наиболее широкое применение находят методы поверхностно пластического деформирования, отличающиеся универсальностью, простотой реализации, высокой производительностью процесса упрочнения и имеющие низкую себестоимость [1]. Важным направлением развития отделочно-упрочняющей обработки является усовершенствование существующих, а также создание инновационных способов поверхностного пластического деформирования, основанных на комплексном энергетическом воздействии на поверхностный слой упрочняемых деталей. К числу перспективных относится способ совмещенной обработки поверхностей ферромагнитных деталей концентрированным потоком энергии вращающегося магнитного поля и магнитно-динамическим накатыванием (далее – совмещенное магнитно-динамическое накатывание (СМДН)), при котором процессы магнитной упрочняющей обработки и динамического поверхностного пластического деформирования совмещены во времени [2; 3]. Комплексное магнитно-силовое воздействие на упрочняемую ферромагнитную деталь позволяет осуществить модификацию ее поверхностного слоя и получить поверхность с высокими качественными и эксплуатационными свойствами [4].

Анализ применения в производственных условиях существующих конструкций инструментов для СМДН цилиндрических поверхностей тел вращения показывает, что существует необходимость их усовершенствования с целью повышения следующих технологических параметров процесса СМДН:

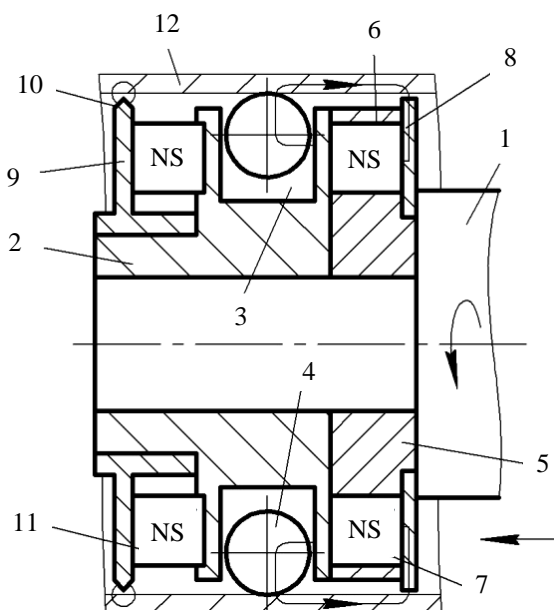
- качества упрочняющей обработки (за счет исключения шаржирования поверхности детали инородными ферромагнитными частицами);
- эффективности процесса упрочнения (за счет исключения «проскальзывания» деформирующих шаров относительно вращающейся магнитной системы);
- долговечности инструмента (за счет уменьшения износа рабочих поверхностей кольцевой камеры, предназначенной для размещения деформирующих шаров).

**Постановка задачи.** В связи с отмеченным актуальной является разработка прогрессивных конструкций инструментов для СМДН цилиндрических поверхностей, позволяющих обеспечить повышение качественных характеристик обработки и эффективности процесса упрочнения, увеличение их долговечности.

На рисунке 1 изображен инструмент для СМДН внутренней цилиндрической поверхности ферромагнитного цилиндра, позволяющий исключить попадание инородных ферромагнитных частиц в зону деформирования и тем самым повысить качество обработки за счет отсутствия шаржирования упрочненной поверхности инородными металлическими включениями.

Инструмент состоит из следующих элементов: оправки 1; корпуса 2; кольцевой камеры 3; деформирующих шаров 4; магнитной системы, включающей диск 5 с аксиальными отверстиями 6, цилиндрические постоянные магниты 7, магнитопроводную шайбу 8; устройства улавливания ферромагнитных частиц, выполненного в виде концентратора 9 с кольцевой кромкой 10 и кольцевого постоянного магни-

та 11 осевой намагниченности. Деформирующие шары 4 свободно установлены в кольцевой камере 3. Оправка 1, корпус 2, диск 5 изготовлены из немагнитопроводных материалов и установлены соосно. Кольцевой постоянный магнит 11 опирается на торцовую поверхность концентратора 9.



**Рисунок 1. – Конструкция инструмента для СМДН цилиндрических поверхностей с устройством улавливания ферромагнитных частиц**

Оправку 1 инструмента закрепляют в шпинделе, а ферромагнитную втулку 12 – в патроне станка. Совмещают оси оправки 1 и втулки 12. При этом кольцевую кромку 10 концентратора 9 и магнитопроводную шайбу 8 устанавливают к упрочняемой поверхности с соответствующими зазорами. Инструмент вращают и перемещают с подачей вдоль упрочняемой поверхности. Силовые линии магнитного поля от кольцевого постоянного магнита 11 замыкаются на поверхность втулки 12 по кольцевой кромке 10 концентратора 9. В результате возникающее в зазоре между упрочняемой поверхностью и кольцевой кромкой 10 концентратора 9 магнитное поле притягивает имеющиеся ферромагнитные частицы, не допуская их попадания в зону расположения деформирующих шаров 4. Вращающееся магнитное поле от цилиндрических постоянных магнитов воздействует одновременно на деформирующие шары 4, а посредством магнитопроводной шайбы 8 и на упрочняемую поверхность ферромагнитной втулки 12. При этом деформирующие шары 4 осуществляют динамическое поверхностное пластическое деформирование поверхности, предварительно очищенной от инородных металлических включений, что исключает ее шаржирование. Одновременно поверхностный слой втулки 12 упрочняется вращающимся магнитным полем. В результате СМДН обеспечиваются высокие качественные характеристики обработки [4].

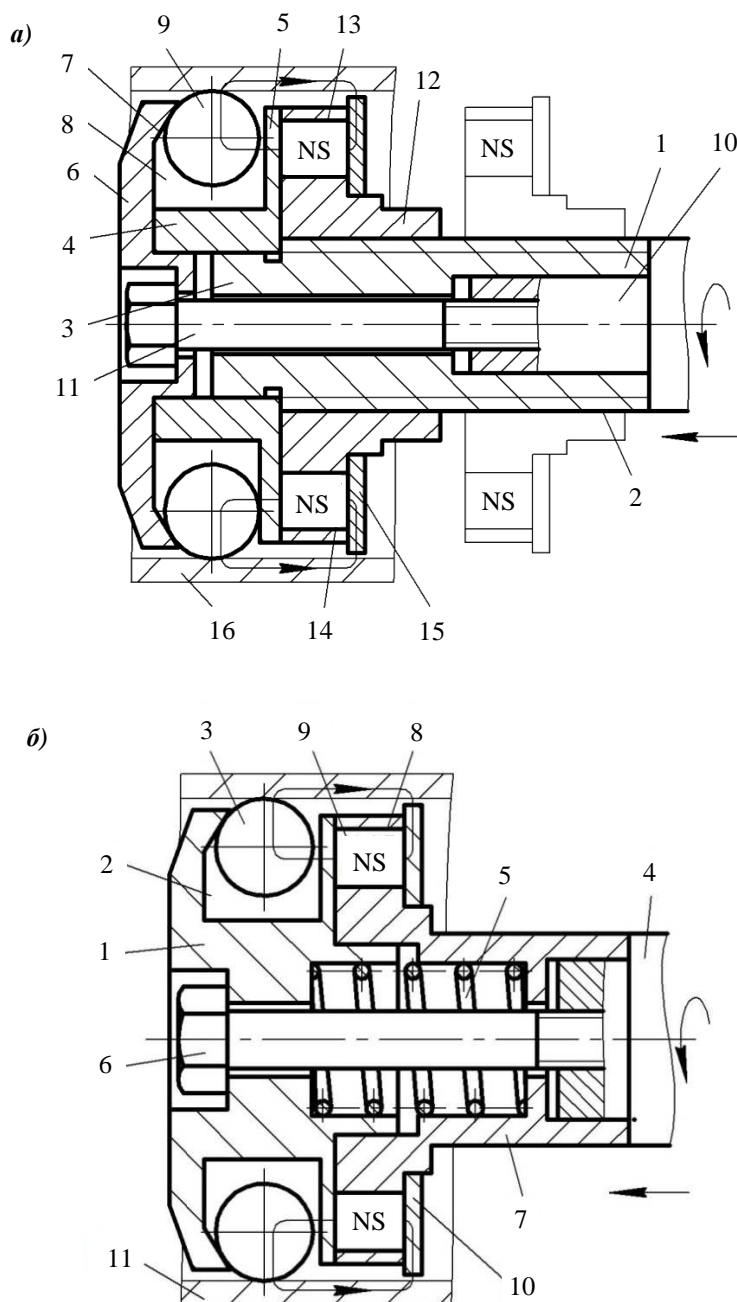
На рисунке 2 а, б изображены инструменты для СМДН поверхностей с подвижной магнитной системой, позволяющей осуществлять (по мере необходимости) качественную очистку кольцевой камеры от попадающих извне инородных ферромагнитных частиц.

В состав инструмента (рисунок 2, а) входят: цилиндрический корпус 1 с резьбовой наружной поверхностью 2 и шейкой 3; стакан 4 с тонкостенным фланцем 5; диск 6 с наклонной поверхностью 7; кольцевая камера 8; деформирующие шары 9; оправка 10; винт 11; магнитная система, включающая держатель 12 с аксиальными отверстиями 13, цилиндрические постоянные магниты 14 и магнитопроводную шайбу 15.

Цилиндрический корпус 1, стакан 4, диск 6, держатель 12 изготовлены из немагнитопроводных материалов и установлены соосно продольной оси оправки 10. В отверстии держателя 12 выполнена резьба, сопрягаемая с резьбой наружной поверхности 2 цилиндрического корпуса 1. Вследствие этого держатель 12 имеет возможность принудительного перемещения вдоль продольной оси инструмента.

Оправку 10 закрепляют в шпинделе, а упрочняемую ферромагнитную деталь 16 в виде тела вращения – в технологическом приспособлении станка и совмещают их продольные оси. Инструмент вращают и перемещают с подачей вдоль упрочняемой внутренней цилиндрической поверхности. Под действием вращающегося магнитного поля от цилиндрических постоянных магнитов 14 деформирующие шары 9

осуществляют динамическое деформирование поверхности детали 16, упрочняемой одновременно вращающимся магнитным полем, введенным в зону обработки магнитопроводной шайбой 15. Реализуемый при этом процесс СМДН поверхности обеспечивает высокие качественные характеристики обработки.



**а** – с принудительным перемещением;  
**б** – с автоматическим перемещением за счет пружины

**Рисунок 2.** – Конструкции инструментов для СМДН с подвижной в осевом направлении магнитной системой

После отделочно-упрочняющей обработки определенного количества деталей шпиндель станка останавливают и выводят инструмент в исходное положение. Принудительно вращают держатель 12 по резьбовой поверхности 2 корпуса 1, образуя при этом зазор между тонкостенным фланцем 5 и торцами цилиндрических постоянных магнитов 14, уменьшающий величину магнитного поля, действующего на деформирующие шары 9. При достижении зазора, исключая воздействие магнитного поля на деформирующие шары 9, осевое перемещение держателя 12 прекращают. Струей воздуха (смазочно-

охлаждающей жидкости) под давлением очищают кольцевую камеру 8 и деформирующие шары 9 от попавших ферромагнитных частиц. Затем держатель 12 вращением перемещают в рабочее положение – до контакта цилиндрических постоянных магнитов 14 с фланцем 5 стакана 4 (рисунок 2, а).

Определенным недостатком описанного инструмента является увеличение вспомогательного времени, связанного с его обслуживанием. На рисунке 2, б изображен инструмент, обеспечивающий автоматическое перемещение магнитной системы инструмента и ее удаление от деформирующих шаров.

Инструмент включает: корпус 1; кольцевую камеру 2; деформирующие шары 3; оправку 4; пружину 5; винт 6; магнитную систему, состоящую из цилиндрической державки 7 с аксиальными отверстиями 8, цилиндрических постоянных магнитов 9, магнитопроводной шайбы 10. Корпус 1 и цилиндрическая державка 7 выполнены из немагнитопроводных материалов.

Принцип работы инструмента такой же, как и в предыдущем случае. Оправку 4 инструмента закрепляют в шпинделе, а ферромагнитный цилиндр 11 – в патроне станка. Инструмент вращают и перемещают с подачей вдоль упрочняемой поверхности. Деформирующие шары 3 инструмента (одновременно с вращающимся магнитным полем) осуществляют деформирование внутренней цилиндрической поверхности, обеспечивающее высокие качественные характеристики обработки.

При необходимости очистки кольцевой камеры 2 и деформирующих шаров 3 от инородных ферромагнитных частиц, шпиндель станка останавливают и выводят инструмент в начальное положение. Поворотом винта 6 включают пружину 5. Под действием осевой силы от пружины 5 магнитная система инструмента отводится от корпуса 1 (деформирующих шаров 3) на заданное расстояние. Кольцевую камеру 2 и деформирующие шары 3 промывают струей смазочно-охлаждающей жидкости под давлением, удаляя имеющиеся инородные ферромагнитные частицы. Винт 6 зажимают и возвращают магнитную систему в рабочее положение. При этом вспомогательное время на обслуживание инструмента сокращается.

На рисунке 3 показан инструмент для СМДН внутренней цилиндрической поверхности, повышающий эффективность процесса упрочнения за счет обеспечения синхронизации вращения деформирующих шаров и магнитной системы.

В состав инструмента входят: цилиндрический корпус 1 с центральными отверстиями 2, 3; насадка 4; кольцевая камера 5; деформирующие шары 6; ротор 7 с радиальными отверстиями 8 и цилиндрическими постоянными магнитами 9; подшипники 10, 11; муфта 12; электродвигатель 13.

Инструмент снабжен дополнительной магнитной системой, предназначенной для намагничивания деформирующих шаров 6 и поверхности ферромагнитной упрочняемой детали, выполненной в виде обоймы 14 с аксиальными отверстиями 15, постоянных цилиндрических магнитов 16, кольцевого магнитопровода 17, защитной прокладки 18.

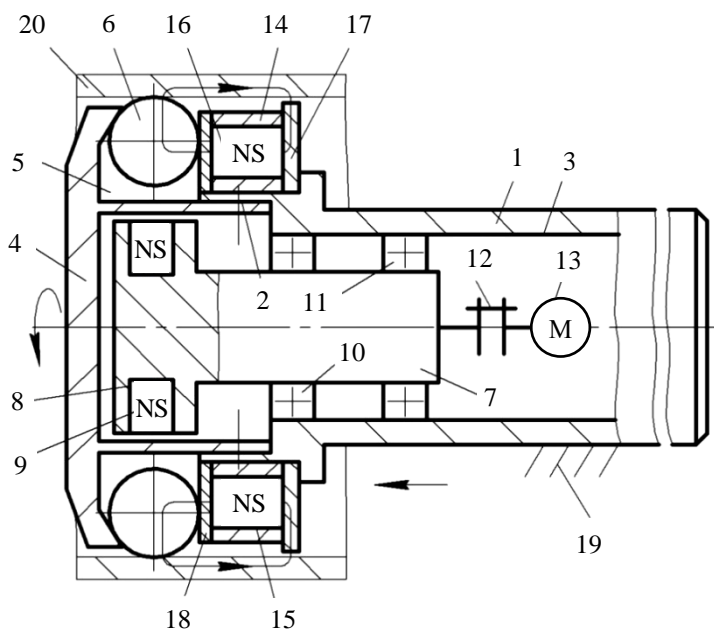


Рисунок 3. – Конструкция инструмента для СМДН с дополнительным намагничиванием деформирующих шаров

Цилиндрический корпус 1, ротор 7, обойма 14, защитная прокладка 18 изготовлены из немагнитопроводных материалов, а насадка 4, как правило, из пластмассы.

Ротор 7 посредством подшипников 10, 11 установлен в центральном отверстии 3 цилиндрического корпуса 1. Насадка 4 цилиндрической поверхностью установлена в центральном отверстии 2 корпуса 1 соосно с ротором 7. Деформирующие шары 6 свободно расположены в кольцевой камере 5 и находятся в магнитном поле, создаваемом цилиндрическими постоянными магнитами 16.

Совмещенную упрочняющую обработку осуществляют следующим образом. Цилиндрический корпус 1 инструмента закрепляют в резцедержателе 19, а ферромагнитный цилиндр 20 – в патроне станка. При этом обеспечивают соосность внутренней поверхности цилиндра 20 и продольной оси ротора 7. Инструмент перемещают с осевой подачей, а ротору 7 с цилиндрическими постоянными магнитами 9 сообщают вращение. Цилиндрические постоянные магниты 9 воздействует магнитным полем на деформирующие шары 6, осуществляя их вращение вокруг продольной оси инструмента. При этом деформирующие шары 6 осуществляют динамическое поверхностное пластическое деформирование.

Так как деформирующие шары 6 предварительно намагничены цилиндрическими постоянными магнитами 16, то имеет место «активная» схема передачи вращения (от ротора 7 – к деформирующим шарам 6), обусловленная взаимодействием между собой магнитных полей, создаваемых цилиндрическими постоянными магнитами 9 и 16.

В результате деформирующие шары 6 и магнитная система ротора 7 вращаются синхронно. Отсутствие «проскальзывания» деформирующих шаров 6 относительно ротора 7 обеспечивает повышение скорости вращения последних, а следовательно, приводит к повышению эффективности процесса динамического поверхностного пластического деформирования упрочняемого цилиндра 20.

Одновременно с динамическим деформированием на поверхностный слой ферромагнитного цилиндра 20 действует магнитное поле, создаваемое цилиндрическими постоянными магнитами 16 (силовые линии магнитного поля показаны на рисунке 3 тонкой линией). Совмещенное упрочнение обеспечивает высокие качественные характеристики обработки.

Особенностью инструмента, изображенного на рисунке 3, является то, что при выходе инструмента из зоны обработки деформирующие шары расходятся в радиальном направлении и динамическим воздействием развальцовывают рабочую коническую поверхность кольцевой камеры. Это снижает долговечность инструмента.

На рисунке 4 представлен инструмент для СМДН, кольцевая камера которого не имеет рабочей конической поверхности. В связи с этим долговечность рабочих поверхностей кольцевой камеры инструмента достаточно высока.

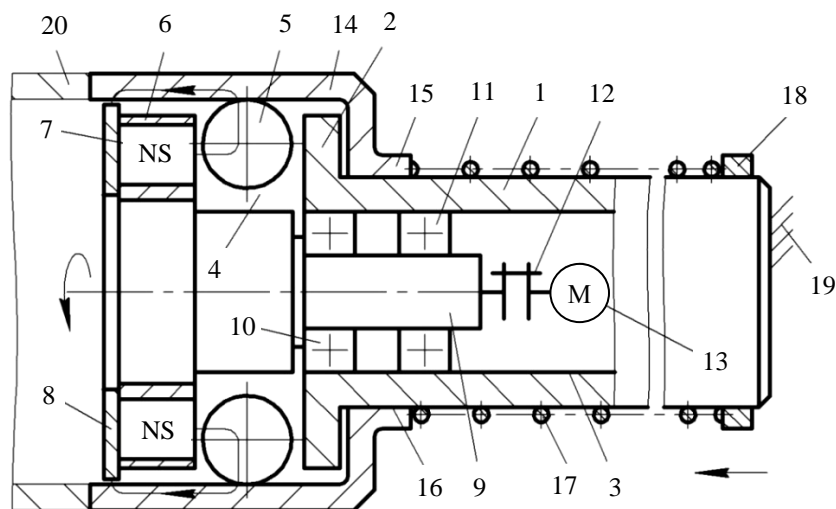


Рисунок 4. – Конструкция инструмента для СМДН с цилиндрической кольцевой камерой и защитным кожухом

Инструмент включает: цилиндрический корпус 1 с фланцем 2 и центральным отверстием 3; цилиндрическую кольцевую камеру 4; деформирующие шары 5; магнитную систему, состоящую из обоймы 6, цилиндрических постоянных магнитов 7, магнитопровода 8; устройство вращения магнитной системы, в состав которого входят ступенчатый ротор 9, подшипники 10, 11, муфта 12 и электродвигатель 13. Инструмент снабжен цилиндрическим кожухом 14 со ступицей 15 и отверстием 16, пружиной 17, буртиком 18. Кожух 14 отверстием 16 охватывает цилиндрический корпус 1 и имеет возможность принудить

тельного осевого перемещения. Пружина 17 взаимодействует торцами со ступицей 15 кожуха 14 и буртиком 18. Обойма 6 и магнитопровод 8 закреплены соосно на ступенчатом роторе 9. Цилиндрический корпус 1, обойма 6, ступенчатый ротор 9 выполнены из немагнитопроводного материала. В исходном состоянии цилиндрический кожух 14 находится в крайнем левом положении, охватывая магнитную систему и кольцевую камеру 4 с деформирующими шарами 5.

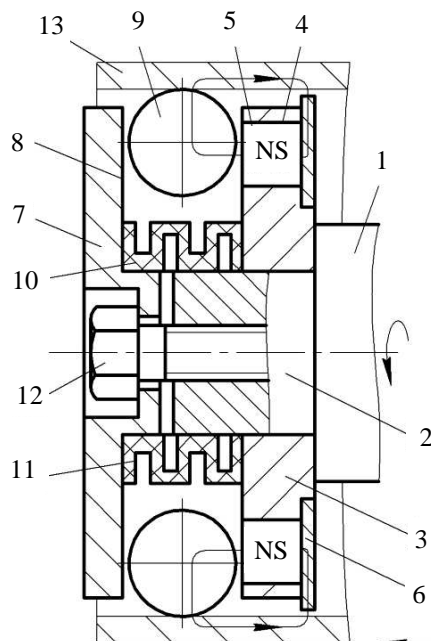
В начале обработки цилиндрический корпус 1 закрепляют в державке резцедержателя 19, а ферромагнитное упрочняемое кольцо 20 – в кондукторе станка, обеспечивая их соосность. Ступенчатому ротору 9 от электродвигателя 13 сообщают вращение, а инструмент перемещают с осевой подачей.

Вращающаяся магнитная система обеспечивает одновременное упрочнение поверхностного слоя ферромагнитного кольца 20 вращающимся магнитным полем и магнитно-динамическим накатыванием, при котором деформирующие шары 5 колеблются и осуществляют динамическое воздействие на упрочняемую поверхность. Это приводит к повышению качественных характеристик обработки.

Данный инструмент для СМДН имеет высокую долговечность, что исключает износ ее рабочих поверхностей.

Конструкции инструментов для СМДН, изображенных на рисунках 1–4, не предусматривают регулировку ширины кольцевой камеры, в которой свободно размещены деформирующие шары. В связи с этим требуется высокая размерная и геометрическая точность изготовления деталей инструмента, определяющих осевые размеры кольцевой камеры.

Этого недостатка лишена конструкция инструмента, представленная на рисунке 5, обеспечивающая возможность точного регулирования ширины кольцевой камеры.



**Рисунок 5. – Конструкция инструмента для СМДН с регулируемой по ширине кольцевой камерой**

Инструмент состоит из следующих деталей: оправки 1 с шейкой 2; диска 3 с аксиальными отверстиями 4; цилиндрических постоянных магнитов 5; магнитопроводной шайбы 6; крышки 7 с торцевой поверхностью 8; деформирующих шаров 9; упругой втулки 10 с окнами 11, выполненными в шахматном порядке; силового винта 12.

Упрочняющую обработку осуществляют следующим образом. Оправку 1 закрепляют в шпинделе станка, а ферромагнитную деталь 13 – в патроне станка. Ось инструмента совмещают с осью детали 13 и вводят деформирующие шары 9 инструмента в обрабатываемое отверстие. Инструмент вращают и перемещают с осевой подачей вдоль упрочняемой поверхности. Вращающееся магнитное поле от цилиндрических постоянных магнитов 5 позволяет обеспечить СМДН, при котором одновременно осуществляется упрочнение поверхности детали 13 деформирующими шарами 9 и магнитным полем. Качественные характеристики обработки вследствие этого существенно повышаются.

При изменении ширины кольцевой камеры инструмента (для компенсации величины износа ее рабочих поверхностей) вновь регулируют величину зазора между поверхностью 8 крышки 7 и дефор-



мирующим шаром 9, осуществляя соответствующий поворот силового винта 12 на требуемую величину. В результате срок эксплуатации инструмента увеличивается. Кроме того, в процессе обработки обеспечивается стабилизация положения геометрических центров вращающихся в кольцевой камере деформирующих шаров 9, что положительно сказывается на качественных характеристиках упрочненного слоя.

**Заключение.** В работе представлены усовершенствованные конструкции инструментов для совмещенного магнитно-динамического накатывания, позволяющие повысить качественные характеристики обработанной поверхности, эффективность процесса совмещенного упрочнения и увеличить срок эксплуатации инструментов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Минаков, А.П. Технологические основы пневмовибродинамической обработки нежестких деталей / А.П. Минаков, А.А. Бунос ; под общ. ред. П.И. Ящерицина. – Минск : Наука и техника, 1995. – 304 с.
2. Способ поверхностного пластического деформирования и инструмент для его осуществления : пат. RU 2068770 / А.М. Довгалев. – Опубл. 10.11.1996.
3. Способ поверхностного пластического деформирования и инструмент для его осуществления : пат. RU 2089373 / А.М. Довгалев. – Опубл. 10.09.1997.
4. Довгалев, А.М. Магнитно-динамическое и совмещенное накатывание поверхностей нежестких деталей / А.М. Довгалев. – Могилев : Белорусско-Российский ун-т, 2017. – 266 с.

Поступила 29.11.2017

#### PROGRESSIVE STRUCTURES OF INSTRUMENTS FOR THE COMBINED MAGNETIC-DYNAMIC STICKING OF CYLINDRICAL SURFACES

*A. DOVGALEV, I. TARADEIKO, N. LEVANOVICH*

*Advanced design tools for combined magnetic-dynamic rolling of internal and external cylindrical surfaces of machine parts on machines of drilling-milling-boring and turning groups containing a compact magnetic system based on permanent cylindrical magnets are presented. In particular, the construction of tools that allow to remove ferromagnetic particles from the surface of the parts being processed, carry out (as necessary) cleaning of the annular chamber and deforming balls from ferromagnetic particles, synchronize the rotational speeds of the deforming balls and the magnetic system, and minimize wear on the end faces of the annular chamber are proposed. As a result of the improvement of tools, the quality characteristics of the treated surface are increased, the hardening process is effective, and the service life is extended.*

**Keywords:** *combined rolling; magnetic system; deforming balls; hardening; rotating magnetic field; modification of the surface layer.*

УДК 621.91.01/02

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ОБРАБОТКИ  
НЕПОЛНЫХ СФЕРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ МАШИН**

*д-р техн. наук, проф. Н.Н. ПОПОК;  
Р.С. ХМЕЛЬНИЦКИЙ; В.С. АНИСИМОВ  
(Полоцкий государственный университет)*

*Представлен технологический маршрут получения неполных сферических поверхностей деталей машин с использованием различных способов комбинированной скоростной лезвийной обработки. Описаны конструкции специальных многолезвийных режущих инструментов и вариант модернизации универсально-заточного станка для реализации комбинированной скоростной обработки. Приведен алгоритм назначения режимов резания для обработки неполных сферических поверхностей с обеспечением параметра  $Ra$  шероховатости поверхности в пределах  $0,4...1,2$  мкм и отклонением геометрической формы не более  $0,05$  мм.*

**Ключевые слова:** *неполная сферическая поверхность, технология, скоростная обработка резанием, многолезвийный режущий инструмент, модернизация оборудования, точность, шероховатость.*

**Введение.** В технике широко применяются детали с неполными сферическими поверхностями, такие как шаровой палец опоры автомобиля, шаровая заглушка запорной арматуры, шар рукоятки переключения механизмов машин и другие [1]. Эти детали отличаются габаритами, предъявляемыми к ним требованиями по точности, качеству и надежности. Для их изготовления используются различные методы обработки: литья, давления, порошковой металлургии, резания. С целью повышения качества и точности получения сферических поверхностей чаще всего применяется резание, включающее как лезвийную, так и абразивную обработку [2].

Как известно, абразивная обработка имеет низкую производительность, сопровождается прижогами, шаржированием абразивными зёрнами и насыщением химическими веществами обработанной поверхности детали. Вследствие этого в настоящее время зарубежные и отечественные производители стремятся исключить абразивную обработку из технологических процессов получения деталей и заменить её высокоскоростной лезвийной обработкой [3]. Высокоскоростная обработка (ВСО) осуществляется при частотах вращения порядка  $10\ 000...40\ 000$  мин<sup>-1</sup>, что соответствует скорости резания более 200 м/мин и обеспечивает снижение сил и температуры за счёт создания благоприятных условий для деформационных процессов и отвода теплоты преимущественно в стружку. В свою очередь, это позволяет сократить основное машинное время, повысить производительность резания и расширить возможности чистовой обработки лезвийным инструментом до качества абразивной обработки. Однако ВСО требует применения дорогостоящих приводов и шпинделей станков, специальных инструментальных материалов и покрытий, не позволяет использовать режущие инструменты большого диаметра (как правило, используют фрезы диаметром не более 20 мм) из-за снижения мощности высокоскоростного привода. В этой связи представляет практический интерес использование возможностей широко применяемых в машиностроительном производстве универсальных шлифовальных и заточных станков, оснащенных приводами с частотой вращения  $3\ 000$  мин<sup>-1</sup> и более, для скоростной обработки лезвийными режущими инструментами, в частности вращающимися, оснащенными стандартными режущими пластинами. Применительно к получению неполных (ограниченных с одной или двух сторон) наружных и внутренних сферических поверхностей деталей может быть реализована комбинированная лезвийная обработка на основе вращений инструмента и детали и циклического поступательного их перемещения [4].

**Основная часть.** Технологические маршруты изготовления деталей машин с использованием комбинированной скоростной лезвийной обработки неполных сферических поверхностей включают следующие основные операции: заготовительную, предварительную обработку, комбинированную скоростную лезвийную обработку неполных сферических поверхностей и контрольную.

Исходя из материала, конфигурации и количества изготавливаемых деталей с неполными сферическими поверхностями выбирается один из методов получения заготовки – литьём, штамповкой, холодной высадкой, прокаткой, порошковой металлургией.

Обработку неполных сферических поверхностей деталей целесообразно производить после обработки всех других поверхностей детали. В зависимости от конструкции детали для обработки этих поверхностей, могут применяться токарные, фрезерные, сверлильные, шлифовальные и другие необходимые станки. Полученные в результате предварительной обработки поверхности используются в качестве базовых для последующей операции комбинированной скоростной лезвийной обработки. Кроме того,

на операциях предварительной обработки производится черновая обработка участка со сферической поверхностью, заключающаяся либо в образовании сферической поверхности с припуском под окончательную комбинированную скоростную обработку, либо в образовании цилиндрической поверхности со снятыми фасками. При необходимости термической обработки детали сферическая поверхность предварительно обрабатывается с припуском под окончательную обработку.

Подбор оборудования и технологического оснащения для комбинированной скоростной обработки производится исходя из обеспечения точной установки осей вращения заготовки и инструмента под углом  $\eta$ , значение которого зависит от формы неполной сферической поверхности и рассчитывается по формуле:

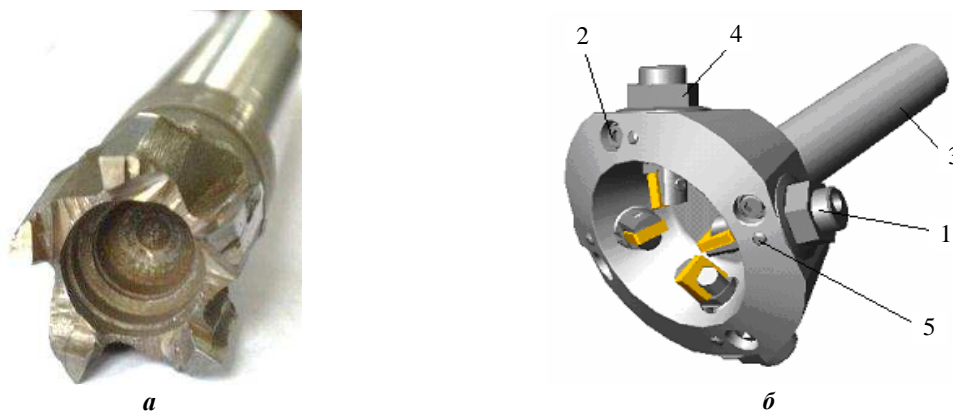
$$\eta = \arccos \left( \sqrt{\frac{H}{D_{сф}}} \right), \quad (1)$$

где  $H$  – высота сферической поверхности, мм;  $D_{сф}$  – диаметр сферической поверхности детали, мм.

Для обработки сферических поверхностей  $D_{сф}$  режущие лезвия инструмента настраиваются на размер

$$D = \sqrt{D_{сф} H}. \quad (2)$$

Для комбинированной скоростной обработки неполных сферических поверхностей используется многолезвийный режущий инструмент. Напайной режущий инструмент (рисунок 1, а) обладают низкой универсальностью, так как не имеют возможности перенастройки на диаметр обрабатываемой сферической поверхности. Но в условиях единичного производства при обработке сферических поверхностей малого диаметра (до 35 мм) его можно изготовить из концевой фрезы с напайными пластинами. Сборный режущий инструмент (рисунок 1, б) обладает большей универсальностью, так как имеет возможность перенастройки лезвий на размер  $D$ . Для этого в конструкции режущего инструмента предусмотрено применение оригинальных резовых блоков 1, которые устанавливаются в корпус 3, и при помощи лимб-гайки 4 могут обеспечить точную и быструю перенастройку лезвий на размер  $D$  без снятия инструмента со станка. С целью предотвращения поворота блока резового 1 вокруг оси при настройке на размер предусмотрен штифт резьбовой 5. Закрепление блоков резовых 1 происходит при помощи зажима 2.



**Рисунок 1. – Конструкция напайного (а) и сборного (б) режущего инструмента для комбинированной скоростной обработки сферических поверхностей**

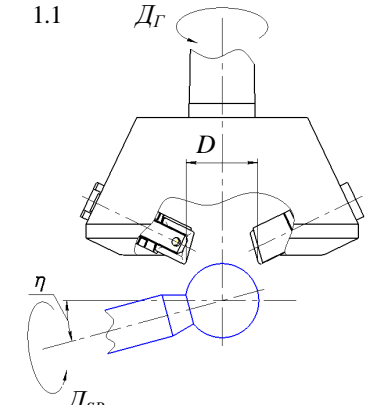
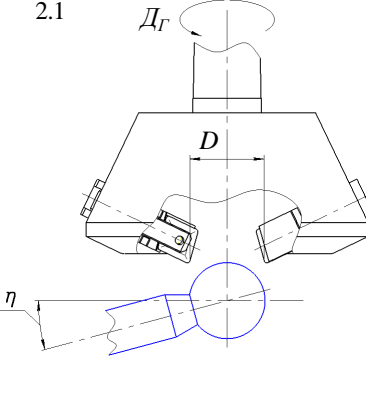
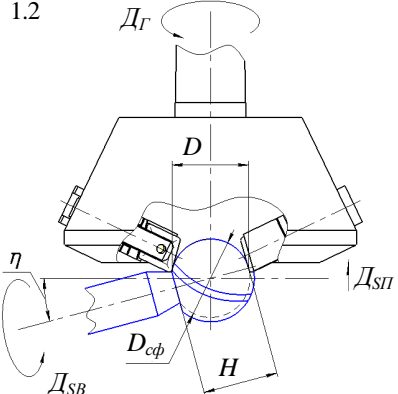
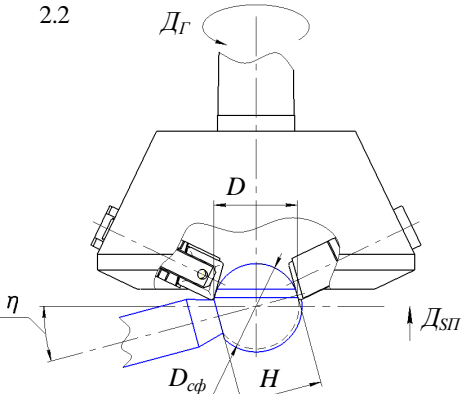
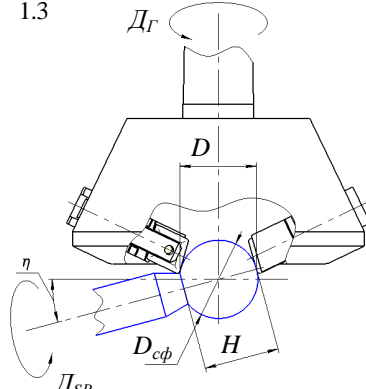
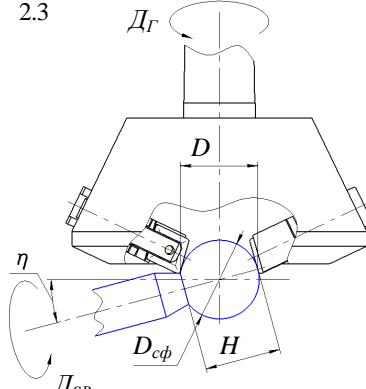
В качестве базового оборудования могут быть использованы заточные, шлифовальные фрезерные и токарные станки, соответствующим образом модернизированные. Например, предлагается использовать универсально-заточной станок 1 модели 3М642 с приспособлением для наружного круглого шлифования 2 модели 3Е642Е.П17 (рисунок 2). Модернизация предлагаемого оборудования заключается в оснащении специальным стендом, который оснащен частотными преобразователями 4, позволяющими увеличить частоту вращения шпинделя станка до  $12\,000\text{ мин}^{-1}$ , а также бесступенчато регулировать частоту вращения шпинделя станка и приспособления.

Комбинированная скоростная лезвийная обработка неполных сферических поверхностей деталей может осуществляться двумя способами, отличающимися последовательностью реализацией движений резания, приведёнными в таблице 1.

По *первому способу* первоначально инструменту и заготовке сообщаются вращательные движения вокруг своих осей  $D_I$  и  $D_{SB}$  соответственно (таблица 1, п. 1.1). Затем в зависимости от применяемого оборудования и технологического оснащения инструменту или заготовке сообщается поступательное дви-

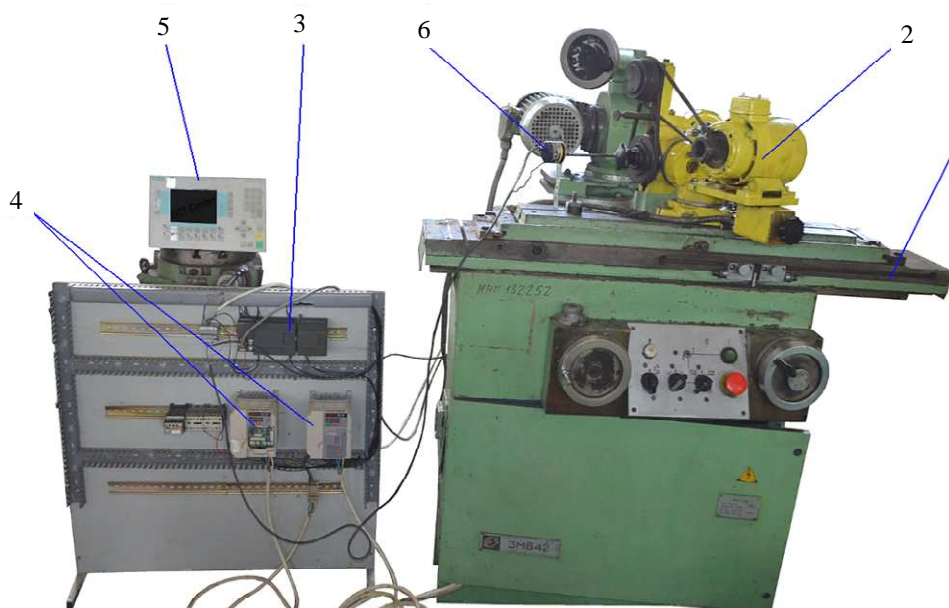
жение подачи  $D_{СП}$  (таблица 1, п. 1.2). В результате обеспечивается равномерное снятие припуска со всей сферической поверхности заготовки. При выходе вершин лезвий инструмента на ось сферической поверхности, в результате которого обеспечивается окончательный размер  $D_{сф}$ , поступательное движение подачи  $D_{СП}$  отключается, и начинается процесс выглаживания сферической поверхности за счёт вращения инструмента  $D_{Г}$  и заготовки  $D_{SB}$  (таблица 1, п. 1.3). Данный способ обработки применяется при необходимости снятия больших значений величины припуска.

Таблица 1. – Способы реализации комбинированной скоростной лезвийной обработки в технологическом маршруте

Первый способ	Второй способ
<p>1.1 <math>D_{Г}</math></p> 	<p>2.1 <math>D_{Г}</math></p> 
<p>1.2 <math>D_{Г}</math></p> 	<p>2.2 <math>D_{Г}</math></p> 
<p>1.3 <math>D_{Г}</math></p> 	<p>2.3 <math>D_{Г}</math></p> 

*Второй способ* применяется при окончательной обработке с небольшими значениями припуска и заключается во врезании на окончательный размер сферической поверхности при отсутствии вращательного движения заготовки. То есть вначале инструменту сообщают вращательное главное движение  $D_{Г}$  (таблица 1, п. 2.1). Далее при помощи поступательного движения подачи  $D_{СП}$  осуществляется врезание инструмента на размер сферической поверхности  $D_{сф}$  в невращающуюся заготовку (таблица 1, п. 2.2). После

чего поступательное движение подачи  $D_{СП}$  отключается, а заготовке сообщается вращательное движение подачи  $D_{SB}$  вокруг собственной оси, в результате которого осуществляется распространение процесса резания с образованием сферической поверхности на детали – процесс выглаживания (таблица 1, п. 2.3).



1 – станок модели 3М642; 2 – приспособление для наружного круглого шлифования 3Е642Е.П17; 3 – промышленный контроллер; 4 – частотные преобразователи; 5 – операторская панель; 6 – энкодер

Рисунок 2. – Модернизированный универсально-заточной станок модели 3М642

Назначение режимов резания для скоростной комбинированной обработки неполной сферической поверхности проводится в следующей последовательности [5]:

1) назначается скорость главного движения резания (окружная скорость инструмента)  $v_1$  исходя из рекомендаций справочников или каталогов инструментальных фирм в зависимости от обрабатываемого и выбранного инструментального материала;

2) рассчитывается подача на оборот инструмента по формуле:

$$S_o = \sqrt{\frac{-1 + \sqrt{1 + 64r^2 a^2}}{2a^2}}, \quad (3)$$

в которой

$$a = \frac{2r + R_{сф}}{2 \cdot R_{сф} \cdot Rz} = \frac{4r + D_{сф}}{2D_{сф} \cdot Rz},$$

где  $R_{сф}$  ( $D_{сф}$ ) – радиус (диаметр) сферической поверхности детали, мм;  $r$  – радиус закругления вершины лезвия, мм;  $Rz$  – шероховатость сферической поверхности, мм;

3) рассчитывается частота вращения инструмента

$$n_1 = \frac{1000 \cdot v_1}{\pi \cdot \sqrt{D_{сф}} H}; \quad (4)$$

4) рассчитывается частота вращения заготовки

$$n_2 = \frac{n_1 S_0}{\pi D_{сф}}; \quad (4)$$

5) назначается исходя из полученных результатов исследований [6] поперечная подача в диапазоне 0,5...6 мм/мин.

Для проверки качества и точности обработки неполной сферической поверхности детали первоначально производится визуальный осмотр, в ходе которого контролируется наличие «сетчатого» рельефа на поверхности. Отсутствие «сетчатого» рельефа свидетельствует об отклонении точности формы и по-

вышенной шероховатости поверхности. Определение параметра шероховатости на экваторе сферической поверхности производится путём сравнения с образцами шероховатости поверхности, полученными торцовым фрезерованием, или измеряется при помощи специальных измерительных средств, таких, например, как профилограф-профилометр модели «Taylor Hobson precision Form Taly surf 120».

Результаты измерения шероховатости сферической поверхности диаметром 35 мм после комбинированной скоростной лезвийной обработки с частотой вращения инструмента от 3150 до 12000 мин<sup>-1</sup> показали, что параметры Ra шероховатости на полюсе и экваторе сферической поверхности получаются разными (рисунок 3).

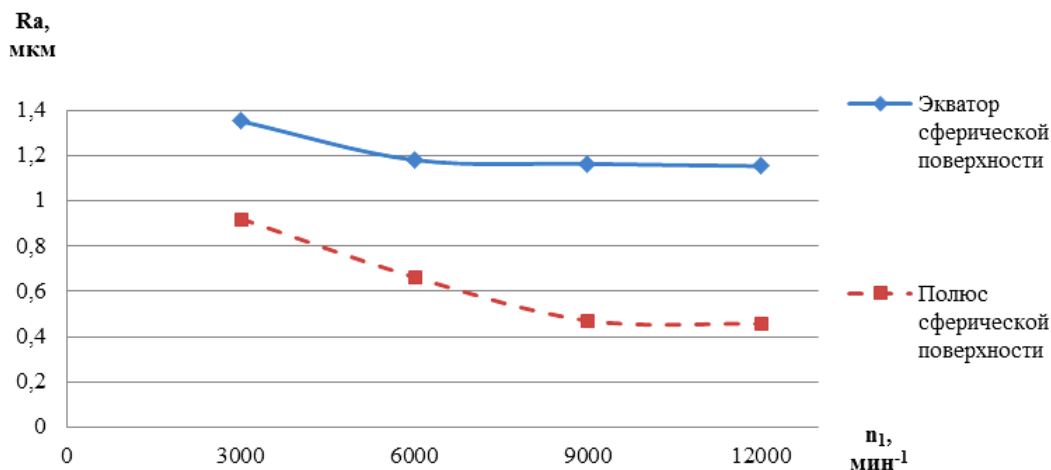


Рисунок 3. – Зависимость шероховатости обработанной сферической поверхности диаметром 35 мм от частоты вращения инструмента

Из графика видно, что с увеличением частоты вращения инструмента шероховатость обработанной поверхности снижается с Ra 1,4...0,9 до Ra 1,2...0,4 мкм, причём меньшее значение шероховатости соответствует обработанной поверхности вблизи полюса сферы, что объясняется кинематическими особенностями обработки.

Точность геометрической формы сферической поверхности может быть оценена при помощи кругломера или микрометра. Использование микрометра позволяет проводить определение точности отклонения формы обработанной сферической поверхности непосредственно на станке, для этого необходимо произвести измерения в плоскости, определяющей её «сжатость», так называемый «диаметральный размер», и в других четырёх плоскостях, определяющих отклонение размеров сферы в этих плоскостях от диаметрального размера. Схемы измерений представлены на рисунке 4.

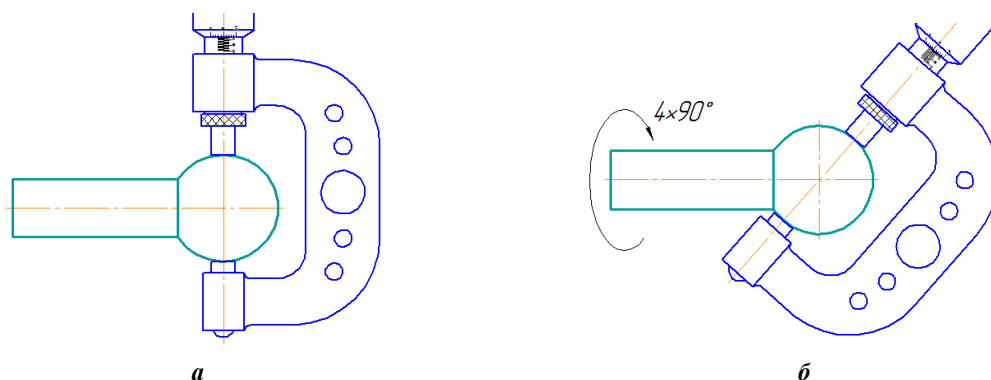


Рисунок 4. – Схемы измерения диаметрального размера (а) и размера в 4-х сечениях (б)

Результаты измерения точности обработанной сферической поверхности показали, что отклонение размеров диаметров находится в пределах 0,05 мм.

Типовые технологические маршруты таких часто встречающихся деталей, как шаровой палец опоры автомобиля и пробка шарового крана, с использованием комбинированной скоростной лезвийной обработки неполных сферических поверхностей в единичном и мелкосерийном производствах с исполь-

зованием модернизированного универсального оборудования будут состоять как минимум из 3 операций, приведенных в таблице 2.

Таблица 2. – Типовые технологические маршруты скоростной обработки деталей с неполными сферическими поверхностями

Наименование операции, оборудование, инструмент, наименование перехода	Получаемая форма на операции при обработке	
	шаровой палец опоры автомобиля	пробка шарового крана
1	2	3
1. <i>Заготовительная</i> Станок: отрезной или токарный. Инструмент: стандартный. Получение заготовки из проката с требуемыми размерами $D$ и $l$		
2. <i>Токарная</i> Станок: токарный. Инструмент: стандартный. Обработка всех поверхностей детали с обеспечением размеров по чертежу за исключением участка с неполной сферической поверхностью, на котором производится снятие фасок		
3. <i>Комбинированная скоростная</i> Станок: шлифовально-заточной. Инструмент: специальный лезвийный инструмент для скоростной обработки неполных сферических поверхностей, оснащенный пластинами твердого сплава с многослойными покрытиями, кубическим нитридом бора (КНБ) или минералокерамикой. Комбинированная скоростная обработка неполной сферической поверхности с получением требуемых размеров $D_{сф}$ и $H$ .		

В качестве заготовок в представленных типовых процессах выбраны пруток для шарового пальца опоры автомобиля и толстостенная труба для пробки шарового крана.

В случаях необходимости проведения термической обработки комбинированную скоростную операцию разбивают на предварительную и окончательную. На окончательной операции сферическая поверхность вместо шлифования доводится с использованием комбинированной скоростной лезвийной обработки. Используется специальный режущий инструмент, оснащенный пластинами из КНБ или минералокерамики.

**Заключение.** На основании результатов проведенного исследования по разработке технологии обработки неполных сферических поверхностей деталей машин сделаны следующие *выводы*:

- *разработан* технологический маршрут изготовления деталей с неполными сферическими поверхностями, включающий операцию комбинированной скоростной обработки. Эта операция отличается последовательностью реализации движений резания и съема припуска в зависимости от формы заготовки, предложенным диапазоном скорости резания;

- *предложены* конструкции составных и сборных режущих инструментов, позволяющих обрабатывать неполные сферические поверхности деталей машин в диапазоне диаметров 10...70 мм с высокой точностью и качеством;



- произведена модернизация универсального заточного станка модели 3М642 путем включения в электрические цепи приводов инструмента и детали датчиков обратной связи по скорости, программируемого логического контроллера, коммутационных устройств для управления двигателями приводов, блока питания и панели оператора. Это позволяет без сложных систем ЧПУ управлять бесступенчато частотой вращения приводов и измерять мощность резания;

- предложены формулы для расчёта частоты вращения инструмента и заготовки, что позволяет определить рациональные диапазоны режима резания с учётом заданной шероховатости поверхности и геометрических параметров детали;

- предложена на операции контроля точности формы схема измерения с использованием микрометра, что позволяет реализовать её в условиях единичного и мелкосерийного производства. Результаты измерений точности и шероховатости сферической поверхности детали после комбинированной скоростной обработки позволяют рекомендовать её вместо шлифования.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Иллюстрированный определитель деталей общемашиностроительного применения : руководящий техн. материал : кл. 40 и 50 общесоюз. классификатора пром-сти и с.-х. продукции. – М. : Изд-во стандартов, 1976. – 238 с.
2. Хмельницкий, Р.С. Исследование процесса обработки сферических поверхностей деталей способом охватывающего фрезерования / Р.С. Хмельницкий // Вестник Полоцкого государственного университета. Сер. В, Прикладные науки. Промышленность. – 2007. – № 8. – С. 53–58.
3. Научно-образовательный курс. Высокоскоростная обработка [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [bmstu.ru/content/image/files/novo.doc](http://bmstu.ru/content/image/files/novo.doc). – Дата доступа: 29.10.2017.
4. Попок, Н.Н. Моделирование влияния шероховатости сферической поверхности детали на выбор скорости подачи вращающегося режущего инструмента / Н.Н. Попок [и др.] // Вестник Полоцкого государственного университета. Сер. В, Прикладные науки. Промышленность. – 2016. – № 3. – С. 28–38.
5. Попок, Н.Н. Режимы резания при высокоскоростном охватывающем фрезеровании сферических поверхностей / Н.Н. Попок, Р.С. Хмельницкий, А.В. Цубанов // Перспективные направления развития технологии машиностроения и металлообработки: тез. докл. междунар. науч.-техн. конф., Минск, 10–11 апреля 2013 г. ; редкол.: В.К. Шелег (отв. ред.) [и др.]. – Минск, 2013. – С. 80–82.
6. Попок, Н.Н. Комплексные исследования физических и технологических характеристик процесса обработки сферических поверхностей деталей [и др.] // Вестн. Белорусско-Российского ун-та. – 2017. – № 2 (55). – С. 87–97.
7. Хмельницкий, Р.С. Исследование точности фрезерования и точения сферических поверхностей деталей / Р.С. Хмельницкий, В.С. Анисимов, Г.И. Гвоздь // Электронный сборник трудов молодых специалистов Полоц. гос. ун-та. Вып. 15 (85). Промышленность. Машиностроение. – Новополоцк : ПГУ, 2016. – С. 165–168.
8. Попок, Н.Н. Исследование шероховатости и точности сферических поверхностей деталей, обработанных фрезерованием / Н.Н. Попок, Р.С. Хмельницкий, В.С. Анисимов // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 27–28 апреля 2017 г. / М-во образования Респ. Беларусь, М-во образования и науки Российской Фед., Белорусско-Российский ун-т ; редкол. : И.С. Сазонов (гл. ред.) [и др.]. – Могилев : Белорусско-Российский ун-т, 2017. – С. 41–42.

Поступила 02.02.2018

#### PROCESSING TECHNOLOGY FOR PARTIAL SPHERICAL SURFACES OF MACHINE PARTS

*N. POPOK, R. HMELNICKY, V. ANISIMOV*

*A technological route for obtaining partial spherical surfaces of machine parts using various methods of combined high-speed blade machining is presented. The design of special multi-blade cutting tools and the modernization option for a universal grinding machine for the implementation of combined high-speed machining are described. The algorithm for setting cutting conditions for processing partial spherical surfaces with providing Ra of the surface roughness in the range of 0.4...1.2 μm and deviation of the geometric shape is not more than 0.05 mm is provided.*

**Keywords:** *partial spherical surface, technology, rapid cutting, multi-blade cutting tool, improved cutting machine, roughness, accuracy.*



УДК 621.941.02-229

## ПОВЫШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ ДЕТАЛЕЙ НИТЕПРОВОДНОЙ ГАРНИТУРЫ РАЗМОТОЧНЫХ И ТРОСТИЛЬНО-КРУТИЛЬНЫХ МАШИН МЕТОДОМ ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

канд. техн. наук, доц. А.М. ДОЛГИХ; Н.А. СТАНКЕВИЧ  
(Полоцкий государственный университет)

*Изучены некоторые характеристики и эксплуатационная стойкость деталей нитепроводной гарнитуры размоточных и тростильно-крутильных машин. Рассматривается нитепроводник как один из основных их элементов. Показано, что эта деталь должна обладать высокой износостойкостью и поверхностью с низкой шероховатостью для уменьшения обрывностей нити. Повышенную износостойкость можно получить, применяя специальные сплавы, керамические материалы термической и химико-термической обработкой сплавов на основе железа. Исследованы такие важные для характеристики процесса изнашивания параметры, как абразивная износостойкость и характеристики качества поверхности покрытий. Предложен оптимальный состав для ванадирования и технология нанесения защитных покрытий методом химико-термической обработки. Проведенные производственные испытания подтвердили эффективность нанесения диффузионных ванадированных покрытий.*

**Ключевые слова:** эксплуатационная стойкость деталей, абразивная износостойкость, специальные сплавы, ванадирование.

**Введение.** В настоящее время к надежности и долговечности деталей нитепроводной гарнитуры размоточных и тростильно-крутильных машин предъявляются все более высокие требования. Возникновение в них неисправностей и различных отказов снижает производительность и влечет за собой значительное ухудшение качества вырабатываемой продукции.

Особенностями эксплуатации текстильных машин являются сложные условия их работы: высокие скорости (например, частота вращения веретен достигает  $12000 \text{ мин}^{-1}$  и более), повышенные динамические воздействия (чесальные, ленточные машины и пр.) и большие удельные нагрузки. Кроме того, большинство нитепроводящих рабочих органов текстильных машин работают в запыленной среде, обладающей явно выраженными абразивными свойствами, при повышенной влажности (например, рабочие органы прядильных и ткацких машин).

Износ нитепроводящих деталей приводит к снижению прочности нитей, оказывает отрицательное влияние на обрывность, вместе с тем нитепроводники из материала с более высокой твердостью сильнее повреждают пряжу, что подтверждается в специальной литературе [1; 2]. Между тем другие способы повышения износостойкости рабочих органов (например, совершенствование формы и конструкции) мало используются, хотя здесь скрыты немалые резервы. Для повышения их износостойкости применяют как конструктивные, так и различные способы поверхностного упрочнения, в частности, анодирование в парогазовой фазе, хромирование, ванадирование, термомагнитная обработка и пр. Традиционный метод повышения износостойкости путем применения более твердых и износостойких материалов или покрытий в настоящее время не всегда рентабелен, так как рабочие органы изготавливаются с алмазным покрытием или из высокотвердых материалов, например, окиси титана. Использование такого метода повышения износостойкости ограничивает его высокая стоимость [3–7].

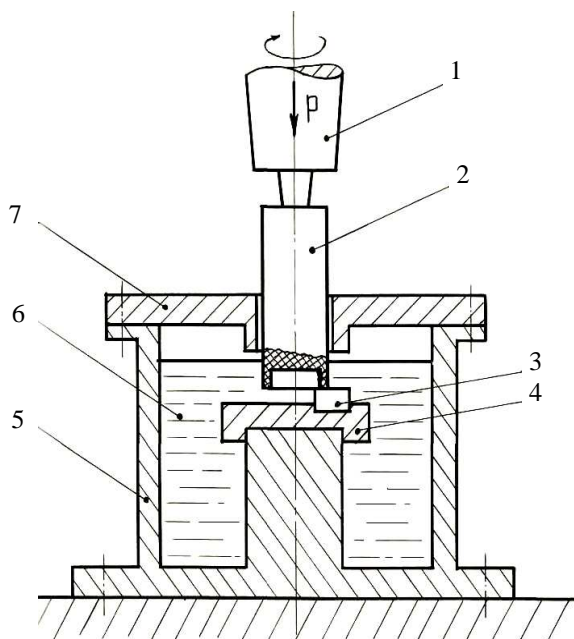
**Материалы и методика эксперимента.** Анализ микроструктуры и измерение толщины диффузионного слоя проводили на металлографических микроскопах МИМ-8 с увеличением 100...1000 крат на поперечных и косых шлифах. Микротвердость полученных покрытий измеряли на приборе ПМТ-5 при нагрузке 0,49 и 0,98 Н. Шероховатость поверхности образцов до и после насыщения оценивали на профилографе-профилометре модели 201 завода «Калибр» согласно [8].

Испытания на износостойкость при трении скольжения без смазки проводили на машине типа МИ и машине типа Шкоды – Савина. При испытании на машине типа МИ образец  $10 \times 10 \times 15 \text{ мм}$  с притертыми торцами, закрепленный неподвижно, изнашивали в паре с контртелом из стали Р18 (наружный диаметр диска 40 мм, толщина 10 мм, твердость 60...62 HRCэ) при скорости скольжения 1 м/с и удельном давлении 1,96 МПа. Износостойкость оценивали по потере массы на единицу рабочей поверхности образца на километр пути трения. Образцы охлаждались от температуры насыщения в контейнерах на воздухе и дополнительной термической обработке не подвергались.

Испытания на абразивное изнашивание при трении о закрепленные абразивные частицы проводили по методике, описанной в [9], на машине трения Х4-Б. Образцы диаметром 5 и высотой 15 мм изнашивали торцевой поверхностью о шлифовальную шкурку бумажную 720-100П1 зернистостью I4A-электрокорунд

нормальный при нагрузке 10 Н·м. Нагрузку принимали из расчета 0,3 кгс на образец диаметром 2,0 мм. Каждый образец изнашивался по новой дорожке. В качестве эталона использовали образцы из закаленной и низкоотпущенной стали У10 с твердостью 60...61 HRCэ. Износостойкость оценивали по потере массы образца. Взвешивание производили на аналитических весах ВЛА-200 ГМ с точностью 0,1 мг.

Износостойкость при трении скольжения в агрессивных средах исследовали на специально сконструированной установке. На рисунке приведена схема испытаний на износ в агрессивных средах. Установка выполнена на основе настольного вертикально-сверлильного станка 2М112. Испытания проводили в контейнере, изготовленном из нержавеющей стали Х25, в агрессивной среде. Образец фиксировался в державке, исследуемая поверхность которого устанавливалась строго в одной плоскости с горизонтальной поверхностью вращения торца контртела.



1 – шпindel; 2 – контртело; 3 – образец; 4 – державка;  
5 – контейнер; 6 – агрессивная среда

Рисунок 1. – Схема испытаний на износ в агрессивных средах

Контртело изготовлено из твердого сплава Т15К6 в форме цилиндра с глухим отверстием; крепится при помощи патрона в шпинделе сверлильного станка. Нагрузка  $P$  на шпindel передается через ременную передачу вертикального перемещения шпинделя, для чего к барабану вертикального перемещения шпинделя подвешивается груз. В контейнер после установки державки с образцом заливается агрессивная жидкость, контейнер закрывается крышкой, а контртело опускается до соприкосновения с образцом, к барабану подвешивается груз и включается привод станка.

После завершения испытания шпindel станка с закрепленным на нем контртелом поднимается, крышка снимается и производится замер величины износа. Износ замерялся при помощи индикаторного нутромера с индикатором часового типа, установленным на стойке, жестко закрепленной на станине станка. При определении величины износа высокотвердых материалов нуль отсчета фиксировался шупом нутромера при соприкосновении с неизношенной поверхностью образца. Последующим перемещением шупа в канавку износа производился отсчет истинного значения определяемого параметра износа.

В качестве агрессивных сред при испытаниях использовались вода при 20 °С и 25%-ный раствор серной кислоты в воде. Образцы размерами 5×10×15 мм изнашивали при удельном давлении 1,96 МПа и скорости скольжения 2,2 м/с.

Составы смесей, используемых для насыщения образцов, приведены в таблице 1.

Для проведения всех видов сравнительных испытаний на износостойкость выбран следующий режим насыщения:

- температура процесса химико-термической обработки  $t = 1100$  °С;
- продолжительность процесса  $\tau = 6$  часов.

Данный режим насыщения обеспечивал толщину диффузионных слоев, достаточную для проведения сравнительных испытаний.

Таблица 1. – Исследуемые составы силикотермических смесей

Тип слоя	Состав смеси
Cr (20% Кр1)	98% [30% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + 70% (20% Кр1 + 80% Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )] + 2% NH <sub>4</sub> Cl
Cr (20% СК25)	98% [40% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + 60% (20% СК25 + 80% Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )] + 2% NH <sub>4</sub> Cl
Cr (25% СК25)	98% [40% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + 60% (25% СК25 + 75% Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )] + 2% NH <sub>4</sub> Cl
V (30% СК25)	98% [40% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + 60% (30% СК25 + 70% V <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )] + 2% NH <sub>4</sub> Cl
V (35% СК25)	98% [40% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + 60% (35% СК25 + 65% V <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )] + 2% NH <sub>4</sub> Cl
Cr + Si (25% Кр1)	98% [30% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + 70% (25% Кр1 + 75% Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )] + 2% NH <sub>4</sub> Cl
Cr + Si (30% Кр1)	98% [30% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + 70% (30% Кр1 + 70% Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )] + 2% NH <sub>4</sub> Cl
Cr + Si (30% СК25)	98% [40% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + 60% (30% СК25 + 70% Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )] + 2% NH <sub>4</sub> Cl
Cr + Ti	98% {40% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + 60% [30% СК25 + 70% (60% Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + 40% TiO <sub>2</sub> )]} + 2% NH <sub>4</sub> Cl
Cr + Zr	98% {30% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + 70% [25% СК25 + 75% (60% Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + 40% ZrO <sub>2</sub> )]} + 2% NH <sub>4</sub> Cl
Cr + V	98% {40% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + 60% [30% СК25 + 70% (40% Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + 60% V <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )]} + 2% NH <sub>4</sub> Cl
Cr + Nb	98% {40% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + 60% [30% СК25 + 70% (60% Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + 40% Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )]} + 2% NH <sub>4</sub> Cl
Cr + Mo	98% {40% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + 60% [35% СК25 + 65% (60% Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + 40% MoO <sub>3</sub> )]} + 2% NH <sub>4</sub> Cl
Cr + W	98% {40% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + 60% [30% СК25 + 70% (80% Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + 20% WO <sub>3</sub> )]} + 2% NH <sub>4</sub> Cl

**Основная часть.** Для правильного выбора материала нитепроводящего рабочего органа и определения требуемой конструкции необходимо учитывать как вид фрикционного контакта текстильного продукта с поверхностью органа, так и влияние качества поверхности рабочего органа на степень повреждения элементарных волокон, т.е. на прочность нити.

В текстильных машинах можно выделить два вида периодичности контакта нитевидного продукта с рабочими органами: 1) «постоянный» – неподвижный (фиксированный) относительно поверхности детали; 2) «периодический» – непостоянный, перемещающийся относительно поверхности рабочего органа [7].

При взаимодействии нитевидного продукта с рабочим органом возникает давление в контакте. В большинстве текстильных машин встречаются следующие способы создания давления в контакте: 1) путем зажима нитевидного продукта между двумя поверхностями; 2) путем огибания и скольжения нитевидного продукта по криволинейной поверхности; 3) за счет иных сил (например, силы инерции). В предлагаемой классификации каждый способ создания давления в контакте определяет тип рабочего органа.

Стекловолокно обладает большой изнашивающей способностью. Основными причинами снижения работоспособности нитепроводящей гарнитуры размоточных и тростильно-крутильных машин при выпуске крученых стеклонитей (в 1...8 сложений) являются: микросколы (заусеницы – незаметный дефект при изготовлении нитепроводников); износ рабочих поверхностей нитепроводящих деталей стекловолокном; интенсивное загрязнение глазков дефектных нитепроводников; образование пуха, непроизвольное попадание которого в пряжу приводит к ухудшению её внешнего вида; повышение обрывности при выпуске стеклонитей; получение сеченых, ворсистых нитей.

На участке между нитепроводником и движущимся по прядильному кольцу бегунком образуется баллонированный участок стекловолокна, который играет важную роль в процессе размотки и кручения. Геометрическая форма нитепроводника, его расположение, состояние поверхности в немалой степени оказывают влияние на баллонированный участок пряжи и процесс прядения. На размоточных и тростильно-крутильных машинах для стекловолокна применяют нитепроводники из проволоки в виде пространственной спирали в 1..1,5 витка, поверхность которых подвергается диффузионному упрочнению, обеспечивая тем самым низкую трудоемкость изготовления, правильную геометрическую форму нитепроводящего участка, высокую чистоту поверхности, удобство заправки нити и т.п.

Для повышения износостойкости рабочих органов текстильных машин используются более износостойкие материалы и покрытия, а также совершенствование конструкции рабочих органов.

Представляется, что традиционный метод повышения износостойкости путем применения более твердых материалов или покрытий в настоящее время близок к исчерпанию, так как рабочие органы машин изготавливают из высокотвердых материалов (например, окиси титана) или с алмазным покрытием. Кроме того, использование данного метода повышения износостойкости ограничивает высокая его стоимость. Следовательно, разработка новых методов повышения износостойкости является актуальной задачей.

Нитепроводник – один из основных элементов прядильных и мотальных машин, размоточно-тростильно-крутильных. Эта деталь должна обладать высокой износостойкостью и иметь поверхность с низкой шероховатостью для уменьшения обрывностей нити. Повышенную износостойкость обеспечи-

вают специальные сплавы и керамические материалы или термическая обработка сплавов на основе железа. Второй путь предпочтительнее ввиду низкой стоимости конструкционной стали с широким спектром возможных методов термообработки.

Одним из признанных методов повышения эксплуатационных характеристик нитепроводников является химико-термическая обработка (ХТО), которая радикальным образом изменяет состав и физико-химические свойства поверхностных слоев деталей, что позволяет значительно повысить их износостойкость. Особый интерес представляет изучение свойств и закономерностей формирования диффузионных слоев, образованных карбидообразующими элементами (процесс ванадирования недостаточно освещен). Процессы диффузионного насыщения с засыпкой деталей насыщающей смесью проводят в контейнерах с плавкими затворами при температуре 1000...1100 °С в течение 6...12 часов.

Сравнительные данные по износостойкости диффузионных слоев приведены в таблице 2.

Таблица 2. – Сравнительная износостойкость диффузионно-упрочненных сталей У8, У10

Тип слоя	Абразивный износ сталь У8		Сухое трение скольжения сталь У10		Трение скольжения в агрессивных средах сталь У8	
	машина типа Х4-Б		машина типа МИ		износ, мкм	
	потеря массы, мг	ε	потеря массы, мг	ε	вода, 20 °С	25%-ный раствор H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> в воде
Cr (20% Cr1)	2,4	7,5	1,6	13,3		
Cr (20% СК25)	1,3	13,5	1,7	12,5	50	78
Cr (25% СК25)	2	9	1,8	11,8		
V (30% СК25)	1,6	11,4	5,2	4,1		
V (35% СК25)	0,7	26,5	0,8	26,5	15	7
Cr + Si (25% Кр1)	–	–	1,9	11,2		
Cr + Si (30% Кр1)	2,7	6,6	1,8	11,8		
Cr + Si (30% Кр25)	2,1	8,6	1,7	12,5		
Cr + Ti	1,5	12,2	1,7	12,5	65	50
Cr + Zr	2,4	7,5	12,1	1,7		
Cr + V	1,4	12,5	1,5	14,1	60	18
Cr + Nb	2,8	6,3	1,5	14,5	115	120
Cr + Mo	1,6	11,25	17,1	1,2		
Cr + W	1,6	11,15	2,2	9,6		
В исходном состоянии*	18,0	1	21,2	1		

\* закалка + низкий отпуск.

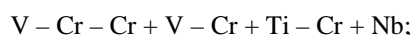
На машине типа МИ наибольшую износостойкость показали ванадированные слои, затем слои типа: Cr + Nb; Cr + V; Cr (20% Кр1); Cr + Si (30% СК25); Cr + Ti; Cr + Si (30% Кр1). В процессе эксплуатации деталей в промышленных условиях они нередко подвергаются одновременному воздействию нескольких разрушающих факторов. Однако в литературе этот вопрос освещен недостаточно.

Для выяснения закономерностей разрушения полученных диффузионных слоев при одновременном воздействии агрессивной среды и трении скольжения были проведены испытания.

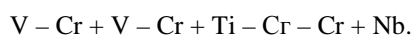
В качестве агрессивных сред выбраны: вода при 20 °С и 25%-ный водный раствор серной кислоты, наиболее часто применяемый в химической промышленности.

Типы слоев по их стойкости в агрессивных средах располагаются в порядке убывания в следующие ряды:

- в воде (при 20 °С)



- в 25%-ном растворе серной кислоты в воде



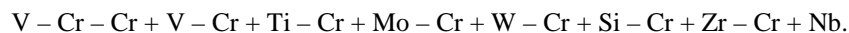
Очевидно, что все разработанные типы диффузионных слоев значительно повышают абразивную износостойкость стали У8.

Максимальной износостойкостью обладают ванадированные и хромированные слои.

Диффузионные слои, образованные при насыщении одновременно двумя элементами (Cr + V; Cr + Ti; Cr + Mo; Cr + W), обеспечивают одинаковую износостойкость; несколько меньшую износостойкость показывают хромосилицированные слои.

Минимальной стойкостью обладают слои типа Cr + Zr и Cr + Nb.

По убывающей стойкости против абразивного изнашивания слои можно расположить в следующий ряд:



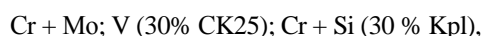
Следует также отметить значительное преимущество ванадированных слоев по сравнению с хромированными.

Шероховатость поверхности деталей после химико-термической обработки является важной характеристикой, показывающей необходимость в проведении дополнительных операций по улучшению качества поверхности.

Шероховатость поверхности до и после химико-термической обработки оценивалась по среднему арифметическому отклонению профиля (Ra).

Лучшими показателями обладают хромированные слои типа Cr (20% СК25) и Cr (25% СК25), класс чистоты которых снижается на несколько разрядов – с 8в у исходной поверхности до 8а у хромированной.

Самые низкие показатели для стали У10 у диффузионных слоев следующего типа:



для стали 08кп слоев типа



Изменение шероховатости поверхности, размеров и массы образцов после химико-термической обработки показано в таблице 3.

Таблица 3. – Изменение шероховатости поверхности, размеров и массы образцов после диффузионного насыщения сталей в силикотермических смесях

Тип слоя	Шероховатость поверхности для стали				Изменение размеров образцов (толщина 5 мм) для стали	
	У10		08кп		У10	08кп
	Ra	класс	Ra	класс		
Cr (20% Кр1)	1,05	7а	0,71	7в	0,07	0,03
Cr (20% СК25)	0,52	8а	0,55	8а	0,08	0,04
Cr (25% СК25)	0,56	8а	0,59	8а	0,08	0,05
V (30% СК25)	1,1	7а	0,63	8а	0,01	0,01
V (35% СК25)	1,0	7а	0,56	8а	0,04	0,01
Cr + Si (25% Кр1)	0,69	7в	0,59	8а	0,12	0,06
С	1,15	7а	2,1	6а	0,06	–
Cr + Ti	1,0	7а	1,1	7а	0,06	0,03
Cr + Zr	0,69	7в	3,4	–	0,04	0,02
Cr + V	0,72	7в	2,2	6а	0,08	0,04
Cr + Nb	0,8	7б	0,44	8б	0,07	0,04
Cr + Mo	1,2	7а	1,3	6в	0,06	0,01
Cr + W	0,71	7в	0,6	8а	0,09	0,05
В исходном состоянии	0,36	8в	0,39	8в	–	–

Анализ изменения размеров образцов после диффузионного насыщения показывает, что прирост размеров образцов стали У10 приблизительно в два раза выше, чем у стали 08кп. Это можно объяснить тем, что на стали У10 формируется карбидный слой, преимущественно растущий наружу за счет встречной диффузии углерода к поверхности образца. Изучение влияния диффузионного насыщения на изменение линейных размеров и качество поверхности важно при упрочнении точных деталей, не подвергающихся дальнейшей механической доводке.

Существенное влияние на эксплуатационные свойства поверхности и выбор вида последующей механической обработки оказывают технологические характеристики диффузионно-упрочненных поверхностей сталей. Изменение шероховатости поверхности, размеров и массы образцов после химико-термической обработки показано в таблице 4.

Практически для всех исследованных типов диффузионных слоев после химико-термической обработки шероховатость поверхности повышается на один класс. Лучшими показателями обладают хромированные слои Cr (20% СК25) и Cr (25% СК25), класс чистоты которых снижается на несколько рядов – с 8в у исходной поверхности до 8а у хромированной. Самые низкие показатели для стали У10 у диффузионных слоев типа; Cr + Mo, V (30% СК25) и Cr + Si (30% Кр1); для стали 08кп – Cr + Zr, Cr + V и Cr + Si (30% Кр1).

Таблица 4. – Относительная износостойкость нитепроводников из различных материалов и с диффузионными ванадированными покрытиями

Наименование материала	Микротвердость HV, ГПа	Износостойкость, время до появления видимых порезов, ч
Латунь Л59 ГОСТ 1652.0-71	1,03	24
Сталь 20 (в исходном состоянии)	1,98	160
Сталь 20 (цементация, закалка, отпуск)	6,21	504
Сталь 20 (гальванический хром)	9,34	2412
Сталь У8 (ванадированная) в смеси состава V (35% СК25)	14,00	8000
Минералокерамика ЦМ 332	16,00	Более 9000

При использовании ванадирования как способа диффузионного упрочнения микротвёрдость больше микротвердости нитепроводников, подвергнутых хромированию, цементации, а также изготовленных из фарфора, стали в исходном (закаленном) состоянии и латуни, но на несколько единиц меньше, чем у нитепроводников из минералокерамики и твердых сплавов (таблица 5).

Таблица 5. – Относительная износостойкость нитепроводников из различных материалов и с нанесенными диффузионными ванадированными покрытиями (при испытаниях на модернизированном оборудовании)

Наименование материала	Микротвердость HV, ГПа	Относительная износостойкость, ч
Латунь Л59 ГОСТ 1652.0-71	1,03	190
Сталь 20 (в исходном состоянии)	1,98	780
Сталь 20 (цементация, закалка, отпуск)	6,21	1810
Сталь 20 (Гальванический хром)	9,34	Более 4000, видимых порезов не обнаружено
Сталь У8 (диффузионное ванадирование в смеси состава V (35% СК25))	14,00	Более 4000, видимых порезов не обнаружено
Минералокерамика ЦМ 332	16,00	Более 4000, видимых порезов не обнаружено

Таким образом, можно сделать вывод, что диффузионное ванадирование больше всего подходит для ХТО нитепроводников размоточно-крутильных машин, что подтвердили проведенные производственные испытания нитепроводников из различных материалов и с нанесенными ванадированными покрытиями, которые проводились на базе ОАО «Полоцк-Стекловолокно» в цехе № 8 на размоточно-крутильных машинах РКС-83 и тростильно-крутильных ТКС-88.

По полученным результатам составлен акт производственных испытаний. Предварительно испытываемое оборудование подверглось модернизации путем установки дополнительных термообработанных штырей, позволяющих уменьшить угол контакта стеклонити и нитепроводника, что в дальнейшем увеличивает пятно контакта отверстия нитепроводника, повышая тем самым его эксплуатационную стой-

кость. При использовании оборудования с дополнительными штырями в месте их контакта со стеклонитью образуются пуховые шишки, при этом стеклонить разрушается на элементарные волокна, что приводит к браку. Для исключения образования пуховых шишек рекомендуется использовать на штыре вращающуюся втулку, которая за счет вращения будет снижать коэффициент трения нити с контактирующей поверхностью.

Другой способ увеличения эксплуатационной стойкости нитепроводников – уменьшение натяжения в зоне контакта стеклонити и нитепроводника за счет снижения скорости выпуска и приема стекловолокна с бобины. Однако это влечет за собой снижение производительности, что недопустимо в условиях производства.

В заключение проведенного исследования можно сделать следующие **выводы**:

1. В настоящее время к надежности и долговечности деталей нитепроводной гарнитуры размоточных и тростильно-крутильных машин и создаваемых на их основе комплексов предъявляются все более и более высокие требования. Возникновение в них неисправностей и различных отказов снижает производительность и влечет за собой значительное ухудшение качества вырабатываемой продукции и снижение производительности.

2. Основными причинами снижения работоспособности нитепроводящей гарнитуры размоточных и тростильно-крутильных машин при выпуске крученых стеклонитей (в 1...8 сложений) являются: микросколы (заусеницы) – незаметный дефект при изготовлении нитепроводников; износ рабочих поверхностей нитепроводящих деталей стекловолокном; интенсивное загрязнение глазков дефектных нитепроводников высаждением замасливателя и увеличения сил трения на этой поверхности; образование пуха и его непроизвольное попадание в пряжу, вследствие чего происходит ухудшение её внешнего вида; повышение обрывности при выпуске стеклонитей; получение сеченых, ворсистых нитей.

3. Разработаны и широко применяются в практике различные методы повышения эксплуатационной стойкости деталей нитепроводной гарнитуры размоточных и тростильно-крутильных машин, основанные либо на повышении качественных, структурных и фазовых характеристик поверхности, либо на внесении конструктивных изменений.

Существуют различные способы повышения эксплуатационной стойкости деталей нитепроводной гарнитуры размоточных и тростильно-крутильных машин (газотермическое напыление, наплавка, химико-термическая обработка и др.), которые повышая твердость и коррозионную стойкость, создают на поверхности благоприятные остаточные напряжения сжатия, увеличивают надёжность и долговечность деталей машин. Кроме того, увеличение прочности и сопротивления усталости также достигается созданием соответствующих композиций сплавов и технологии обработки. При сохранении достаточно высокой пластичности, вязкости и трещиностойкости данные методы повышают надёжность и долговечность машин, снижают расход металла на их изготовление.

4. Показано, что одним из наиболее эффективных методов повышения эксплуатационных характеристик поверхности и эксплуатационной стойкости деталей машин является химико-термическая обработка металлов, заключающаяся в нагреве и выдержке металлических (а в ряде случаев и неметаллических) материалов при высоких температурах в химически активных средах (твердых, жидких, газообразных). В подавляющем большинстве случаев химико-термическую обработку проводят с целью обогащения поверхностных слоев изделий определенными элементами. В результате химико-термической обработки формируется диффузионный слой, т.е. изменяется химический и фазовый составы, структура и свойства поверхностных слоев.

5. Проведенные с применением стандартных методик испытания показали, что диффузионные слои, полученные при насыщении в силикотермических смесях, показали высокую износостойкость в условиях сухого трения скольжения, износа в агрессивной среде и абразивного износа. Наилучшими показателями в условиях абразивного износа и сухого трения скольжения (машина типа МИ) обладают ванадированные диффузионные слои, нанесенные на стали У8, У10. Диффузионные слои, образованные при насыщении одновременно двумя элементами: Cr + V, Cr + Ti, Cr + Mo, Cr + W, обеспечивают одинаковую износостойкость, несколько меньшую износостойкость показывают хромосилицированные слои. Минимальной стойкостью обладают слои типа Cr + Zr и Cr + Nb.

6. Показано, что практически для всех типов покрытий, полученных при насыщении в силикотермических смесях, происходит прирост массы образцов. При этом наблюдается некоторое ухудшение качества поверхности образцов, которое зависит от типа диффузионного процесса. Шероховатость поверхности деталей после химико-термической обработки является важной характеристикой, показывающей необходимость в проведении дополнительных операций по улучшению качества поверхности. Наилучшими показателями по этому параметру обладают хромированные покрытия.

Изучение влияния диффузионного насыщения на изменение линейных размеров и качество поверхности важно при упрочнении точных деталей, не подвергающихся дальнейшей механической доводке.

7. Результаты проведенных на базе ОАО «Полоцк-Стекловолокно» (в цехе № 8) производственных испытаний показали эффективность ванадированных диффузионных слоев, нанесенных на нитепроводящую гарнитуру.

Представленные материалы имеют практическое применение. Предложенный оптимальный состав для ванадирования и технология нанесения защитных покрытий методом химико-термической обработки могут быть рекомендованы в качестве процесса, значительно улучшающего эксплуатационные показатели стойкости и надежности деталей нитепроводной гарнитуры размоточных и тростильно-крутильных машин, в частности нитепроводников. Проведенные производственные испытания подтвердили эффективность нанесения диффузионных ванадированных покрытий.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Букалов, Г.К. Развитие теории взаимодействия текстильного продукта с нитепроводящими рабочими органами и методов повышения их износостойкости : дис. ... д-ра техн. наук : 05.02.13 / Г.К. Букалов. – Кострома, 2001. – 331 с.
2. Повышение работоспособности нитепроводников машин мокрого кольцевого прядения льна конструктивными и технологическими методами / В.В. Данилов [и др.] // Вестн. Костром. гос. технол. ун-та. – 2005. – № 11.
3. Конструкционные материалы. Справочник / Б.Н. Арзамасов [и др.] ; под ред. Б.Н. Арзамасова. – М. : Машиностроение, 1990. – 688 с.
4. Восстановление деталей машин / Ф.И. Пантелеенко [и др.]. – М. : Машиностроение, 2003. – 672 с.
5. Теплухин, Г.Н. Материаловедение : учеб. пособие / Г.Н. Теплухин, В.Г. Теплухин, И.В. Теплухина. – СПб. : СПбГУТУРП, 2010. – 169 с.
6. Многокомпонентные диффузионные покрытия / под общ. ред. Л.С. Ляховича. – Минск : Наука и техника, 1974. – 288 с.
7. Ворошнин Л.Г. Теория и технология химико-термической обработки : учеб. пособие. – Минск : Новое знание, 2010. – 304 с.
8. Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики : ГОСТ 2789-73. – М. : Изд-во Стандартов, 1978. – 12 с.
9. Металлы. Метод испытания на абразивное изнашивание при трении о закрепленные абразивные частицы : ГОСТ 17367-71. – М. : Гос. комитет стандартов.

Поступила 24.01.2018

#### INCREASING THE OPERATING RESISTANCE OF PARTS NITEPRODUCTIVE HEADSET OF RIDGE AND TROUSER-TORQUE MACHINES BY METHOD OF CHEMICAL-THERMAL PROCESSING

*A. DOLGIKH, N. STANKEVICH*

*Some characteristics and operational durability of the thread guide components of unwind and reel-twisting machines have been studied. The threader is considered as one of their main elements. It is shown that this part must have a high wear resistance and a surface with a low roughness to reduce the interruptions of the filament. Increased wear resistance can be obtained by applying special alloys, ceramic materials of thermal and chemical-thermal treatment of alloys based on iron. The parameters important for the characterization of the wear process were studied, such as abrasive wear resistance and quality characteristics of the coating surface. The optimal composition for vanadium and the technology of applying protective coatings by the method of chemical-thermal treatment are proposed. The conducted production tests confirmed the efficiency of applying diffusion vanadium coatings.*

**Keywords:** *service life of parts, the abrasive wear-resistance, special alloys, vanadium.*



УДК 669.7:624.01

**ПОВЫШЕНИЕ СТОЙКОСТИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ  
АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ**

*чл.-кор. НАН Беларуси, д-р техн. наук, проф. Ф.И. ПАНТЕЛЕЕНКО;  
канд. техн. наук, доц. О.В. ШУМОВ  
(Белорусский национальный технический университет, Минск)*

*Рассмотрены подходы к повышению коррозионной стойкости сварных соединений конструкций из деформируемых алюминиевых сплавов, в частности к повышению их сопротивления коррозии под напряжением. Особенности коррозии под напряжением исследовали для образцов стыковых сварных соединений, полученных дуговой сваркой в среде аргона. Предложено повысить сопротивление коррозии под напряжением за счет использования твердого диоксида углерода для принудительного охлаждения металла, а также подбора оптимальных режимов последующей термической обработки соединяемых элементов. Определены величины сопротивления коррозии сварных соединений, полученных дуговой сваркой в среде аргона как в обычных условиях, так и с использованием твердого диоксида углерода, а также зависимости прочности сварных соединений от режимов отпуска, по которым найдены оптимальные режимы термической обработки для обеспечения высокого сопротивления коррозии.*

**Ключевые слова:** *алюминиевые сплавы, сварные соединения, сопротивление коррозии, диоксид углерода, термическая обработка.*

**Введение.** Деформируемые алюминиевые сплавы широко применяются при производстве сварных конструкций и их элементов, испытывающих небольшие нагрузки и требующие высокого сопротивления коррозии. К данным материалам относятся, например, сплавы системы «алюминий – магний», которые обладают высокой пластичностью, хорошей свариваемостью, высокой коррозионной стойкостью. Требуемые физико-механические и эксплуатационные свойства таких сплавов обеспечиваются за счет легирования твердого раствора или за счет пластической деформации. Эти сплавы применяются, например, для изготовления емкостей, трубопроводов, дверей, перегородок и т.п. [1; 2].

Одним из характерных типов повреждений сварных соединений в таких конструкциях является коррозия. Кроме того, при эксплуатации в данных конструкциях действуют значительные напряжения, которые возникают как вследствие технологии производства, так и от действия рабочей среды и различных нагрузок (гравитационных, ветровых). Суммарное влияние нагрузок и разрушающих воздействий, таких как коррозионная среда, растягивающие напряжения и др., обуславливают наибольшую значимость коррозионно-механического механизма при разрушении конструкций данного типа.

Исследования показывают, что алюминиевые сплавы в области сварных соединений обычно имеют меньшую коррозионную стойкость и меньшую прочность по сравнению с основным металлом [3]. По этой причине повышение физико-механических и эксплуатационных свойств сварных соединений выступает в качестве одного из резервов повышения надежности и увеличения сроков службы конструкций из алюминиевых сплавов.

Ухудшение свойств алюминиевых сплавов в области сварных соединений, получаемых дуговой сваркой, связаны с процессами, протекающими в сплавах под действием высоких температур, окружающей среды, приложенного к соединяемым деталям давления и т.п. В результате воздействия высоких температур при дуговой сварке происходят значительные изменения структуры и свойств алюминиевых сплавов, во многом обуславливающие в дальнейшем характер разрушения деталей из них. К таким изменениям следует отнести возникновение дефектов и остаточных напряжений в области сварного соединения, изменение химического состава и структуры сварного шва, локализацию легкоплавких эвтектик и хрупких фаз по границам зерен сплава, образование пересыщенного твердого раствора легирующего элемента в основном металле, перераспределение вакансий и примесей сплава и т.д. [4].

При высокотемпературном нагреве от действия сварочной дуги происходит ухудшение ряда физико-механических и эксплуатационных свойств алюминиевых сплавов. В частности, ухудшение проявляется в том, что прочностные свойства материалов (временное сопротивление и предел текучести) сварных соединений из алюминиевых сплавов при дуговой сварке в среде аргона без последующей термической обработки составляют у тонколистовых заготовок около 70...75% от показателей прочности основного металла. При этом установлено, что прочностные характеристики сварных соединений из алюминиевых сплавов возможно увеличить на 10...15% за счет термической обработки, выполняемой после процесса сварки [5].

В данной работе ставилась задача повысить коррозионную стойкость, в частности сопротивление коррозии под напряжением, получаемых дуговой сваркой сварных соединений из деформируемых алюминиевых сплавов.

**Методика эксперимента.** Образцы сварных соединений получали дуговой сваркой встык заготовок из деформируемого алюминиевого сплава АМг6 толщиной 4 мм с использованием присадочной проволоки диаметром 3 мм из того же сплава. Сварка осуществлялась вольфрамовым электродом диаметром 3 мм на переменном токе в среде аргона. Показатели прочности сварных соединений определяли в соответствии с требованиями ГОСТ 6996. В результате испытаний установлена величина временного сопротивления  $\sigma_B$ . Для испытаний на прочность использовали стандартные плоские образцы с ослабленным сечением в области сварного шва. Образцы были вырезаны в соответствии с размерами образца типа XXIV из сваренных встык пластин из алюминиевого сплава; выпуклость сварного шва на образцах удалялась до основного металла.

Исследование коррозионной стойкости сварных соединений из алюминиевых сплавов проводилось в соответствии с требованиями ГОСТ 9.019. Образцы сварных соединений испытывались с использованием метода заданной одноосной растягивающей нагрузки, которая создавала в исследуемых образцах напряжение  $0,9 \cdot \sigma_{0,2}$ . В процессе испытаний образцы были постоянно погружены в раствор 3%-ного раствора хлорида натрия при температуре 20 °С. Смена раствора производилась каждые 15 суток.

**Основная часть.** На значения сопротивления коррозии под напряжением сварных соединений в значительной степени оказывают влияние изменения коррозионных и прочностных свойств алюминиевых сплавов при дуговой сварке. Для повышения надежности работы конструкции в условиях коррозионно-напряженного состояния осуществляются различные мероприятия, которые обеспечивают образование благоприятных сжимающих напряжений, уменьшение концентрации напряжений, снижение остаточных растягивающих напряжений, предупреждение возникновения химической неоднородности и образования дефектов в сварных швах и т.д. [6].

Существенный вклад в снижение сопротивления коррозии сварных соединений вносят растягивающие напряжения, возникающие в деталях при сварке. Одним из эффективных методов уменьшения напряжений в соединяемых деталях при дуговой сварке служит принудительное охлаждение высокотемпературной области сварного шва [7]. Помимо уменьшения остаточных напряжений использование принудительного охлаждения позволяет также уменьшить площадь перегретого металла, время нахождения свариваемого металла при повышенных температурах. Так как степень химической неоднородности металла сварного шва, выгорание легирующих элементов в значительной степени зависят от температуры и продолжительности нагрева, то выполнение дуговой сварки с принудительным охлаждением позволяет также уменьшить количество указанных негативных последствий дуговой сварки, вызывающих снижение коррозионных и прочностных характеристик металла.

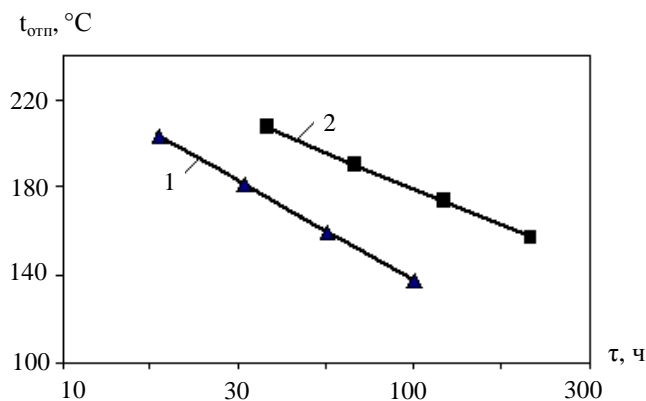
Однако производство дуговой сварки с принудительным охлаждением требует использования дополнительной технологической оснастки для подачи охлаждающей среды в зону сварки, а также вызывает сложности при удалении охлаждающей среды, используя традиционные сварочные материалы. В результате выполнение сварки с охлаждением усложняет производство работ, снижает производительность труда, повышает себестоимость производства, ограничивает технические возможности процесса сварки, ухудшает условия работы сварщика и т.д.

Значительную часть указанных проблем дуговой сварки с охлаждением возможно устранить при использовании для охлаждения соединяемых деталей новых сварочных материалов, в частности твердого диоксида углерода [8]. Эффективность использования данного материала в качестве охладителя связана с его свойствами: высокой охлаждающей способностью, постоянной низкой температурой, способностью переходить из твердого состояния в газообразное состояние без образования жидкой фазы. Исследования показали, что при использовании твердого диоксида углерода в процессе дуговой сварки также обеспечивается стабильное, мягкое горение дуги, снижается разбрызгивание свариваемого металла, устраняется чешуйчатость сварного шва.

В работе исследовалось влияние режимов охлаждения в процессе дуговой сварки, а также режимов последующей термической обработки на сопротивление коррозии под напряжением сварных соединений из алюминиевого сплава марки АМг6. Сварные соединения получали дуговой сваркой в среде аргона при различных условиях охлаждения высокотемпературной области сварного шва. При этом были использованы два варианта охлаждения: охлаждение на воздухе; охлаждение при помощи твердого диоксида углерода. Готовые сварные соединения подвергались термической обработке – отпуску на различных режимах.

Выявлено, что на физико-механические и эксплуатационные свойства сварных соединений, в том числе на коррозионную стойкость, влияют такие параметры структуры, как количество, форма и расположение фаз алюминиевых сплавов [9; 10]. Данными параметрами структуры алюминиевых сплавов в значительной степени возможно управлять за счет изменения параметров термического цикла при сварке изделий и режимов термической обработки, добиваясь тем самым требуемого сочетания свойств сварных конструкций. Чтобы установить режимы термической обработки, обеспечивающие получение высоких значений сопротивления коррозии под напряжением, определены зависимости предела прочно-

сти образцов от температуры и продолжительности отпуска сварных соединений, представленных на рисунке. Графики зависимости строились по характерным точкам изменения прочности, полученным в результате исследований влияния режимов термической обработки на механические свойства алюминиевых сплавов. С помощью этих зависимостей определены параметры термической обработки сварных соединений, обеспечивающих получение повышенных значений пределов текучести и прочности при испытаниях на растяжение.



Диаграммы изменения прочности сварных соединений из алюминиевого сплава с принудительным охлаждением (1); с охлаждением на воздухе (2)

( $t_{отп}$  – температура отпуска, °C;  $\tau$  – длительность отпуска, ч)

Значения сопротивления коррозии под напряжением сварных соединений, полученных при различных режимах термической обработки, приведены в таблице 1.

Сопротивление коррозии под напряжением сварных соединений, сут

Вид охлаждения	Режимы термической обработки		
	Охлаждение на воздухе	15	19
Охлаждение принудительное	18	21	19

Из приведенных в таблице данных можно заключить, что сварные соединения из деформируемого алюминиевого сплава, полученные дуговой сваркой в среде аргона с использованием для охлаждения твердого диоксида углерода, имеют стойкость к коррозии под напряжением в среднем на 14% большую, чем сварные соединения, полученные аргоно-дуговой сваркой без охлаждения.

Данное повышение сопротивления коррозии под напряжением сварных соединений возможно объяснить следующими причинами. *Во-первых*, при использовании твердого диоксида углерода обеспечивается уменьшение площади перегретого металла и длительности пребывания его при высоких температурах, за счет чего снижается выгорание легирующих элементов сварного шва, в частности магния и титана, и снижается ухудшение эксплуатационных и физико-механических свойств металла в процессе дуговой сварки. *Во-вторых*, благодаря высокой охлаждающей способности твердого диоксида углерода, по сравнению с воздухом, достигается высокая скорость охлаждения металла в зоне сварного шва. За счет этого после сварки достигается измельчение структуры металла сварного шва, что вызывает увеличение влияния термической обработки на параметры прочности и коррозионной стойкости сварного соединения. *В-третьих*, благодаря расположению твердого диоксида углерода в процессе сварки непосредственно в области сварного шва, достигается сокращение времени переноса изделия от заковки в охлаждающую среду до минимального значения. Сокращение времени переноса также обеспечивает получение более высокой скорости охлаждения сварного соединения после сварки и увеличение эффекта от термической обработки.

**Заключение.** В результате проведенного исследования изучено влияние условий охлаждения при дуговой сварке в среде аргона и режимов последующей термической обработки на сопротивление коррозии под напряжением сварных соединений из деформируемых алюминиевых сплавов. Установлено, что использование твердого диоксида углерода при дуговой сварке обеспечивает увеличение сопротивления коррозии под напряжением сварных соединений из деформируемых алюминиевых сплавов на 14% по сравнению со сварными соединениями, полученными обычной дуговой сваркой в среде аргона.

Данное изменение коррозионной стойкости сварных соединений можно объяснить:

1) меньшей потерей легирующих элементов металлом сварного шва за счет уменьшения продолжительности и площади нагрева металла до высоких температур в результате охлаждения твердым диоксидом углерода, подаваемым в область сварки;

2) большей скоростью охлаждения металла сварного шва за счет более высокой охлаждающей способности твердого диоксида углерода по сравнению с воздухом и сокращением времени переноса детали от закалки в охлаждающую среду до минимального значения.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Технология электрической сварки металлов и сплавов плавлением ; под ред. Б.Е. Патона. – М. : Машиностроение, 1974. – 768 с.
2. Parmar, K.S. Welding engineering and Technology / K.S. Parmar. – Khanna Publishers, 2005. – 270 p.
3. Фридляндер, И.Н. Алюминиевые деформируемые конструкционные сплавы / И.Н. Фридляндер. – М. : Metallurgia, 1978. – 208 с.
4. Мондольфо, Л.Ф. Структура и свойства алюминиевых сплавов / Л.Ф. Мондольфо. – М. : Metallurgia, 1979. – 640 с.
5. Металловедение алюминия и его сплавов / А.И. Беляев [и др.]. – М. : Metallurgia, 1983. – 280 с.
6. Куликов, В.П. Технология сварки плавлением / В.П. Куликов. – Минск : Дизайн ПРО, 2001. – 256 с.
7. Feng, Z. Processes and Mechanisms of Welding Residual Stress and Distortion / Z. Feng. – Woodhead Publishers, 2005. – 343 p.
8. Пантелеенко, Ф.И. Снижение поверхностных деформаций путем термической обработки в процессе стыковой сварки / Ф.И. Пантелеенко, А. Хейдари Монфаред // Вестник Полоцкого государственного университета. Сер. В, Промышленность. Прикладные науки. – 2011. – № 3. – С. 19–26.
9. Герчикова, Н.С. Тонкая структура и коррозионное растрескивание алюминиевых сплавов / Н.С. Герчикова. – М. : Metallurgia, 1982. – 160 с.
10. Кимкина, С.И. Сопротивление разрушению алюминиевых сплавов / С.И. Кимкина. – М. : Metallurgia, 1981. – 280 с.

Поступила 15.12.2017

#### INCREASING RESISTANCE OF WELDING JOINTS OF ALUMINUM ALLOYS

*F. PANTELEENKO, A. SHUMAV*

*Some approaches to increase the resistance to corrosion of welding joints of wrought aluminum alloys, for example the resistance to stress corrosion have been considered. It has been researched the resistance to corrosion of butt welding joints obtained by argon shielded welding. It has been proposed to increase the resistance to stress corrosion by using the hard carbon dioxide for forced cooling of metal and fitting the subsequent heat treatment conditions. It has been established the values of resistance to stress corrosion of welding joints obtained as usual conditions as with the use of hard carbon dioxide. It was evaluated the functional connections between tempering conditions and strength of welding joints, that permitted to define the optimal heat treatment conditions to reach the high resistance to stress corrosion.*

**Keywords:** *aluminum alloys, welding joints, resistance to corrosion, carbon dioxide, heat treatment.*

УДК 621.9.01

## ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ОБРАБОТКИ ПЛАСТИН ИЗ ПОЛИВИНИЛХЛОРИДНОГО ПЛАСТИКА ПРОБОЙНИКОМ НА КАЧЕСТВО ОБРАБОТАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ

С.А. МАКСИМОВ; д-р техн. наук, проф. Б.С. СУНКУЕВ  
(Витебский государственный технологический университет)

*Рассматривается вопрос экспериментального исследования влияния режимов резания (скорости резания, подачи) при обработке окон и пазов в пластинах из поливинилхлоридного пластика пробойником на качество обработанной поверхности окон и пазов. Приведены результаты экспериментальных исследований влияния скорости пробойника и величины подачи пластины из такого пластика на качество обработанной поверхности окон и пазов в этой пластине. Установлены зависимости качества обработки пластин из поливинилхлоридного пластика пробойником от режимов резания.*

**Ключевые слова:** обработка пластин из поливинилхлоридного пластика, пробойник, качество поверхности, режимы обработки, автоматизированный комплекс.

**Введение и постановка задачи исследования.** Экономия энергетических, материальных и трудовых ресурсов – приоритетное направление в разработке нового оборудования в различных отраслях промышленности. Этот принцип распространяется и на оборудование обувного, а также кожгалантерейного производства. В условиях мелкосерийного, среднесерийного производства возрастает потребность в разного рода полуавтоматах с высокими технологическими возможностями.

Технологическая оснастка к швейным полуавтоматам в значительной степени определяет стоимость и качество выпускаемой продукции. Это объясняется сложностью ее изготовления (для обработки окон и пазов в пластинах кассеты технологической оснастки необходимы фрезерные станки с ЧПУ и дорогостоящий режущий инструмент – фрезы) [1–3]. Кроме того, в настоящее время пластины технологической оснастки изготавливаются из дорогостоящих материалов (алюминиевых сплавов Д12, Д16, Д18 и им подобных). Следует также отметить, что для изготовления технологической оснастки на фрезерных станках с ЧПУ необходимы большие затраты времени, что в современных рыночных условиях нежелательно.

Кафедрой машин и аппаратов легкой промышленности УО «ВГТУ» предложен *метод изготовления пластин кассет из пластин пластика ПВХ* на автоматизированном комплексе для изготовления технологической оснастки [4] с использованием специального инструмента – пробойника, выполненного в виде цилиндрического стержня диаметром 2 мм, установленного в отверстие игловодителя швейной головки швейного полуавтомата, на базе которого выполнен автоматизированный комплекс. Данный метод обеспечивает простоту изготовления и низкую стоимость оснастки.

При изготовлении пластин кассет технологической оснастки к швейным полуавтоматам с ЧПУ на автоматизированном комплексе наиболее ответственной операцией является обработка поверхностей контуров окон и пазов пластин, в которые укладываются заготовки верха обуви, подлежащие сборке в изделие [5]. Контур должен быть изготовлен таким образом, чтобы обеспечивать укладывание в него деталей без зазоров, кроме этого контур должен быть эквидистантен контуру прокладывания соединительной строчки детали, т.е. должен как можно более точно соответствовать эталону.

На практике имеются определенные трудности с получением поверхности окон и пазов в пластинах кассет требуемого качества (экспериментально установлено, что высота неровностей обработанной поверхности окон и пазов в пластинах кассеты не должна превышать 0,1 мм). Эту проблему можно решить, изучив влияние режимов обработки пластин из пластика ПВХ пробойником на качество обработанной поверхности.

Таким образом, цель данного исследования – повышение качества обработки криволинейных контуров окон и пазов в пластинах из пластика ПВХ на основе определения связей между параметрами режимов обработки на автоматизированном комплексе этих пластин и показателями качества обработанной поверхности.

**Основная часть.** Предлагаемый метод обработки окон и пазов в пластинах ПВХ технологической оснастки к швейному полуавтомату с ЧПУ заключается в следующем (рисунок 1): лист пластика ПВХ 1 закрепляется в каретке координатного устройства швейного полуавтомата при помощи специальной линейки 2. Каретка координатного устройства может перемещаться по двум взаимно перпендикулярным направлениям (привод каретки осуществляется от шаговых электродвигателей). Далее запускается программа обработки, происходит перемещение каретки координатного устройства в старт-стопном режиме по заданной управляющей программе, согласно требуемому контуру относительно оси игловодителя швейной головки полуавтомата 3, в котором закреплен режущий инструмент – пробойник 4. В процессе

обработки контуров окон и пазов пробойник совершает вместе с игловодителем возвратно-поступательное движение с определенной скоростью. В период пробивки лист пластика ПВХ неподвижен. Достигнув крайнего нижнего положения, пробойник 4 перемещается вверх. Перемещение кассеты с закрепленным на ней листом ПВХ кареткой координатного устройства производится в периоды, когда пробойник 4 не контактирует с листом ПВХ.

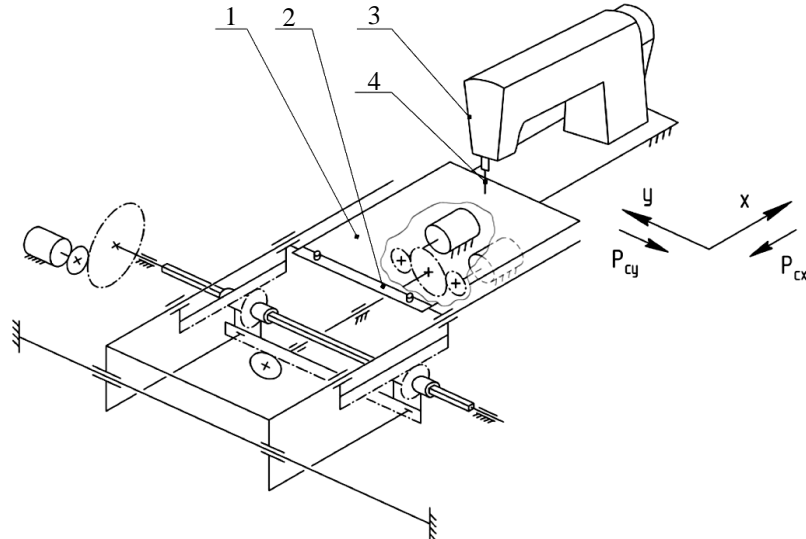
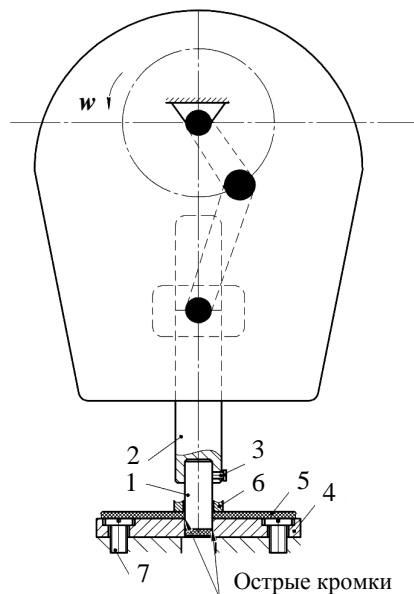


Рисунок 1. – Принципиальная схема автоматизированного комплекса

Швейная головка швейного полуавтомата (рисунок 2) содержит кривошипно-ползунный механизм иглы, посредством которого сообщается возвратно-поступательное перемещение режущему инструменту – пробойнику 1, закрепленному в отверстии игловодителя 2 при помощи винта 3 (рисунок 2).



1 – пробойник; 2 – лист пластика ПВХ;  
3 – игольная пластина

Рисунок 2. – Схема механизма перемещения пробойника

В специальной игольной пластине 4, на поверхности которой расположен лист ПВХ 5 (см. рисунок 2) выполнено сквозное отверстие с острыми кромками, которое располагается соосно пробойнику 1 для его прохода при пробивке листа ПВХ, (во время пробивки лист ПВХ прижат лапкой 6). Крепление специальной игольной пластины осуществляется на платформе швейной головки при помощи винтов 7 (см. рисунок 2) аналогично штатной игольной пластине швейного полуавтомата.

Возвратно-поступательное движение пробойника является главным движением резания в предлагаемом автоматизированном комплексе. В результате сложения этих движений (перемещение координатного устройства с определенным шагом и возвратно-поступательного движения пробойника) формируются требуемые контуры пазов, служащие для позиционирования в них деталей верха обуви или кожгалантерейных изделий и прохода иглы швейной головки при соединении деталей верха обуви или кожгалантерейных изделий ниточными швами.

Иными словами, за каждый двойной ход игловодителя происходит срезание пробойником припуска. Величина срезаемого припуска во время рабочего хода определяется величиной подачи  $S_{пр}$ .

На рисунке 3 показаны теоретический (идеальный) контур окна и фактический контур (реальный), полученный после обработки. Текущая точка  $k$  теоретического контура представлена в подвижной системе координат  $XOY$ , жестко связанной с пластиной ПВХ, координатами  $x, y$ . Фактический контур может отличаться от теоретического вследствие погрешностей позиционирования координатного устройства швейного полуавтомата относительно пробойника [6] и шероховатости обработанной поверхности.

Цель экспериментальных исследований – изучение влияния режимов обработки пластин ПВХ касет технологической оснастки на автоматизированном комплексе для изготовления технологической оснастки к швейному полуавтомату с ЧПУ на качественные показатели обработанной поверхности.

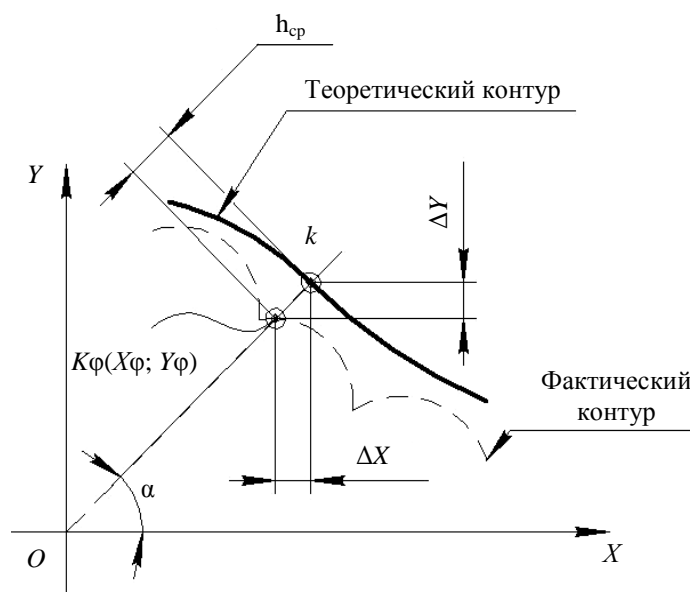


Рисунок 3. – Теоретический контур окна и фактический контур, полученный после обработки

На основании результатов исследований необходимо установить рациональные значения основных параметров (режимов) процесса резания.

С целью выявления влияния режимов резания на качество обработанных поверхностей проведена серия опытов. В качестве факторов, влияющих на качество обработанной поверхности, выбраны скорость резания  $V$  (которая определялась скоростью пробойника в момент касания им пластины ПВХ), подача  $S$  пластины ПВХ (величина перемещения пластины ПВХ между двумя рабочими ходами пробойника) и величина глубины резания (постоянная и равная толщине пластика ПВХ  $t = 1$  мм).

В данных исследованиях в качестве выходного параметра, определяющего качество обработанной поверхности, выбрана величина  $h_{cp}$ :

$$h_{cp} = \frac{\sum_1^n h_i}{n},$$

где  $h_i$  – высота неровностей в  $i$ -той точке участка;  $n$  – число замеряемых точек на участке (в нашем случае принимаем  $n = 10$ ).

Серия опытов заключалась в изготовлении образцов с пазами (рисунок 4), выполненными с различным направлением подачи (1 – перпендикулярно к оси  $X$ ; 2 – параллельно оси  $X$ ; 3 – под углом  $45^\circ$  к оси  $X$ ; 4 – криволинейное), в листе пластика ПВХ при различных режимах обработки (скорости резания  $V$ , подачи  $S$ ) на автоматизированном комплексе для изготовления технологической оснастки к швейному полуавтомату.

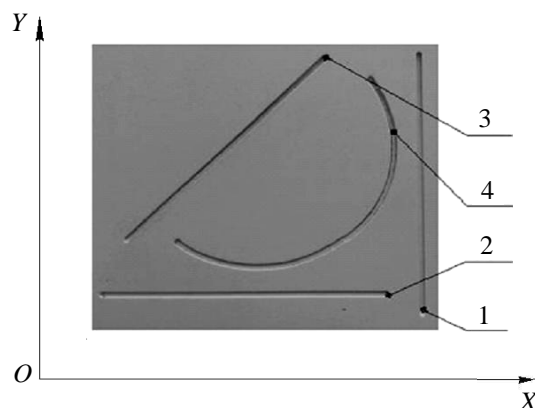


Рисунок 4. – Исследуемые контуры

Для выявления степени влияния переменных факторов процесса резания (скорости  $V$ , подачи  $S$ ) на качество обработанной поверхности при изготовлении пазов (см. рисунок 4) два фактора оставались постоянными, а один варьировался.

Так, для определения влияния скорости резания ( $V$ ) подача  $S = 0,5$  (мм/дв. ход) и глубина резания ( $t = 1$  мм) оставались постоянными, а скорость резания изменялась в диапазоне от 0,4 до 1,03 м/с и определялась в момент касания пробойником поверхности пластины ПВХ.

Для выявления влияния подачи ( $S$ ) она изменялась в диапазоне  $S = 0,2 \dots 0,8$  (мм/дв. ход), скорость резания и глубина при этом оставались постоянными  $V = 0,4$  (м/с),  $t = 1$  мм.

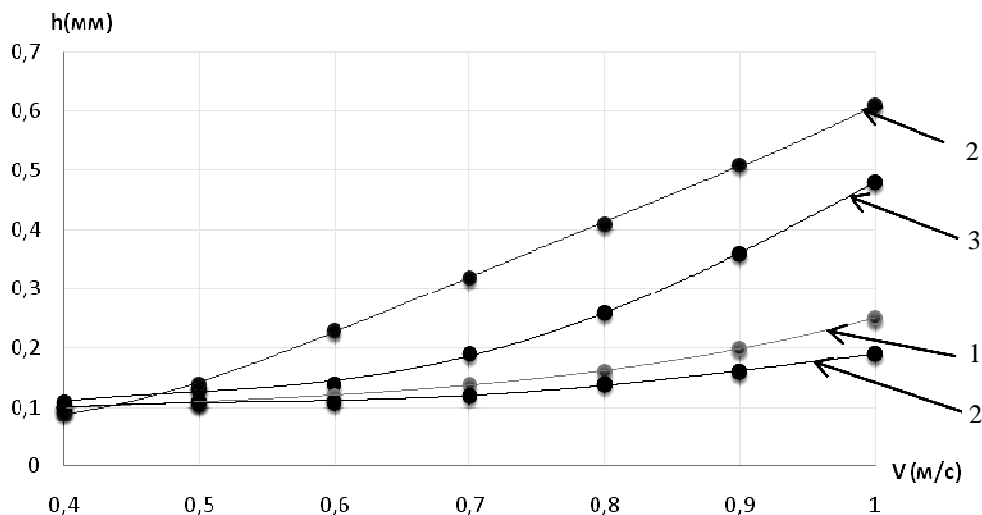
Серия опытов проводилась в лаборатории кафедры «Машины и аппараты легкой промышленности» УО «ВГТУ». Экспериментальная установка создана на базе швейного полуавтомата с микропроцессорным управлением ПШ-1 [7]. В качестве режущего инструмента использовался пробойник диаметром 2 мм, закрепленный верхним концом в отверстии игловодителя швейной головки швейного полуавтомата, в комплекте со специальной игольной пластиной, установленной на платформе швейной головки полуавтомата. В качестве материала для изготовления образцов использовался вспененный пластик ПВХ «Rigid Lite», толщиной 1 мм, основные технические характеристики которого представлены в таблице.

Основные технические характеристики вспененного пластика ПВХ «Rigid Lite»

Наименование показателя	Метод измерения (ASTM)	Единица измерения	Значение
Удельная плотность	D1505	г/м <sup>3</sup>	0,7...0,55
Предел прочности при растяжении, не менее	D638	МПа	14
Относительное удлинение при разрыве, не менее	D638	%	29
Модуль при изгибе	D790	МПа	1050
Предел прочности при изгибе		МПа	27
Ударная вязкость надрезанного образца по Шарпи, не менее	D256	Дж/м <sup>2</sup>	33
Твердость поверхности по Шору	D (DIN53505)		> 50 ед.

При изучении полученных образцов каждый из четырех пазов (см. рисунок 4) на всех образцах был разделен на 10 равных участков (по 10 мм), на каждом из которых взято по десять точек для замера, после чего определялось среднее значение высоты неровностей  $h_{cp}$  для всего паза. Измерения  $h_i$  проводились с помощью микроскопа отсчетного типа МПБ-3, точность измерений составляла 0,01 мм, кратность увеличения  $\times 24$ .

Проведенные исследования позволили получить зависимости величины высоты неровности обработанной поверхности  $h_{cp}$  контуров на листе пластика ПВХ от скорости резания  $V$  и величины подачи  $S$  пластины ПВХ. По результатам частных серий опытов построены графические зависимости влияния режимов обработки ( $V$ ,  $S$ ) на качество обработанной поверхности ( $h_{cp}$ ). Результаты серии опытов, когда постоянными являются подача ( $S = 0,5$  мм/дв. ход) и глубина резания  $t = 1$  мм, а переменными – скорость резания ( $V$ ), представлены графически семейством кривых на рисунке 5.

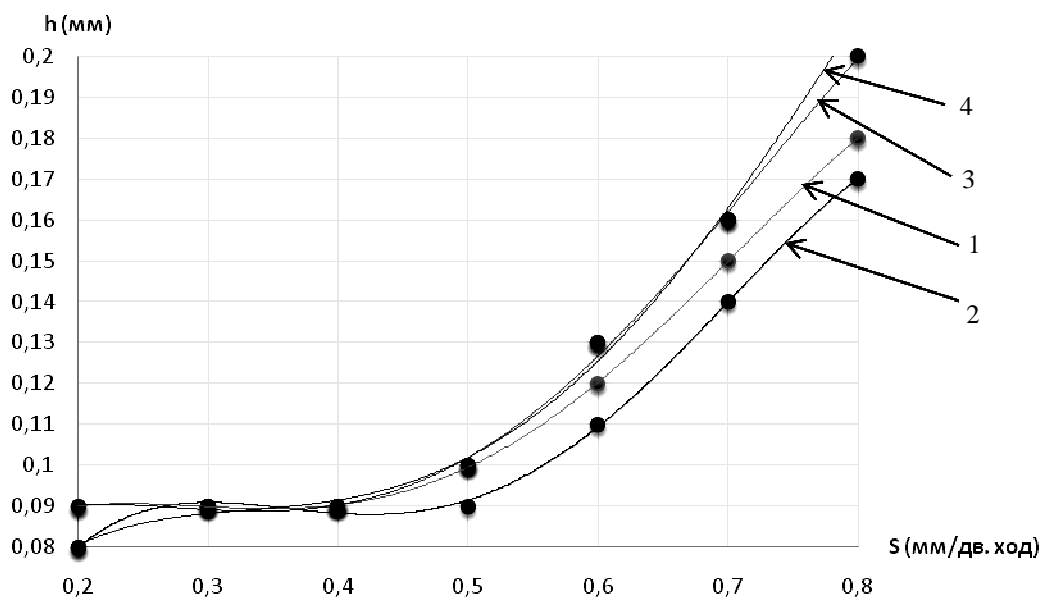


- 1 – график изменения высоты неровностей  $h_{cp}$  по пазу перпендикулярному к оси X;
- 2 – график изменения высоты неровностей  $h_{cp}$  по пазу параллельному к оси X;
- 3 – график изменения высоты неровностей  $h_{cp}$  по пазу под углом  $45^\circ$  к оси X;
- 4 – график изменения высоты неровностей  $h_{cp}$  по криволинейному пазу

Рисунок 5. – Зависимости высоты неровностей  $h_{cp}$  от скорости пробойника при различных направлениях подачи



На рисунке 6 представлено семейство кривых, отражающих результаты экспериментов с постоянными скоростью резания ( $V = 0,4$  м/с) и глубиной резания, величина подачи варьировались.



- 1 – график изменения высоты неровностей  $h_{cp}$  по пазу, перпендикулярному к оси X;  
 2 – график изменения высоты неровностей  $h_{cp}$  по пазу параллельному к оси X;  
 3 – график изменения высоты неровностей  $h_{cp}$  по пазу под углом  $45^\circ$  к оси X;  
 4 – график изменения высоты неровностей  $h_{cp}$  по криволинейному пазу

Рисунок 6. – График зависимости  $h_{cp}$  от величины подачи пластины ПВХ при различных направлениях подачи

### Заключение

Анализируя полученные экспериментальные результаты, сделаны следующие *выводы*:

- 1) при обработке пластин ПВХ пробойником на автоматизированном комплексе режимы резания оказывают существенное влияние на качество обработки;
- 2) увеличение скорости резания приводит к снижению качества обработанной поверхности;
- 3) требуемого качества обработанной поверхности можно достичь при значениях скорости  $V \leq 0,4$  м/с, что соответствует частоте вращения главного вала швейной головки швейного полуавтомата ПШ-1 ( $\omega \leq 420$  об/мин);
- 4) степень влияния величины подачи пластика на качество обработки зависит от величины самой подачи:
  - с увеличением подачи  $S \geq 0,5$  мм/дв. ход пробойника качество обработанной поверхности резко ухудшается;
  - при значениях подачи  $S \leq 0,5$  мм/дв. ход пробойника существенного влияния на качество обработанной поверхности она не оказывает, высота неровностей в этом случае не превышает 0,1 мм.

Следует отметить, что вектор направления подачи также оказывает влияние на высоту неровностей обработанной поверхности. Так, наименьшая высота неровностей ( $h_{cp}$ ) оказалась на параллельном и перпендикулярном к оси X участках, а максимальная – на наклонном и криволинейном.

Таким образом, выполненные экспериментальные исследования позволили установить, что на качество обработанной поверхности пластин заготовок технологической оснастки из пластика ПВХ при их обработке на автоматизированном комплексе значительное влияние оказывает скорость резания  $V$ . Для уменьшения шероховатости следует стремиться к ее уменьшению. Значение величины подачи можно увеличить до 0,5 мм/дв. ход.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Фрезероувальная установка для создания паллет FlatCom 30 // Рекламный проспект фирмы ISEL Германия, 2012. – 4 с.

2. Система для фрезерования паллет PMS-1 // Проспект фирмы USM / USM Австрия, 1989. – 1 с.
3. Computer-controlled Cycle Machine with Input Function AMS-215D // Рекламный проспект фирмы JUKI. – 2002. – 4 с.
4. Максимов, С.А. Автоматизированный комплекс на базе швейного полуавтомата JACK / С.А. Максимов, А.Э. Бувич // Новое в технике и технологии текстильной и легкой промышленности : материалы докл. междунар. науч.-техн. конф., Витебск, ноябрь 2015 г. ; УО «ВГТУ». – Витебск, 2015. – С. 236–238.
5. Бувич, А.Э. Автоматизированное проектирование и изготовление оснастки и разработка управляющих программ к швейному полуавтомату с микропроцессорным управлением / А.Э. Бувич, Б.С. Сункуев // Вестн. ВГТУ. – 2001. – Вып. 3. – С. 43–47.
6. Расчет максимальных погрешностей позиционирования базовой пластины технологической оснастки к швейному полуавтомату с числовым программным управлением / Б.С. Сункуев [и др.] // Вестн. Киевского нац. ун-та технологии и дизайна. – 2015. – № 4 (88). – С. 58–64.
7. Швейный полуавтомат с микропроцессорным управлением : пат. ВУ 4394 / Б.С. Сункуев, О.В. Дервояд, С.А. Беликов, В.Ф. Агафонов, С.А. Маслович, В.И. Зудов, И.Л. Шнейвайс, И.А. Рябов, А.Г. Кириллов, А.С. Малиновский. – Опубл. 30.03.2002.

Поступила 04.01.2018

**INFLUENCE OF THE PROCESSING CONDITIONS  
OF PLATES FROM PLASTIC PVC THE PUNCH,  
ON QUALITY OF THE PROCESSED SURFACE**

**S. MAKSIMOV, B. SUNCUEV**

*The issue of experimental research of influence of cutting conditions (cutting speed  $V$ , feed  $S$ ) during the processing of windows and notches in plates made of plastic PVC with a punch on the surface quality of the windows and grooves is considered. The results of experimental studies of the effect of the speed of the punch and the feed plate, plastic, PVC surface finish of the windows and the grooves in this plate are given. The dependence of the processing quality of PVC plates with a punch from cutting is made.*

**Keywords:** *processing of PVC plastic, punch, surface quality, machining, automated system.*

УДК 621.926

## ТОНКОЕ ИЗМЕЛЬЧЕНИЕ СТЕКЛОБОЯ В МЕЛЬНИЦАХ РАЗЛИЧНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

канд. техн. наук П.С. ГРЕБЕНЧУК; канд. техн. наук Д.Н. БОРОВСКИЙ  
(Белорусский государственный технологический университет, Минск)

*Исследуется сухой помол боя стекла в наиболее эффективных конструкциях измельчителей. Проанализированы проблемы использования стеклобоя в промышленности и особенности его измельчения. Выделены принципиально отличающиеся между собой конструкции мельниц, предполагаемые к использованию для этой цели: дисмембраторная, вибрационная, барабанная шаровая и вертикальная центробежно-шаровая. Представлены результаты экспериментальных исследований по измельчению стеклобоя в мельницах. На основании анализа фракционного состава измельченных продуктов даны рекомендации по использованию рассмотренных мельниц для помола боя стекла.*

**Ключевые слова:** мельницы, стеклобой, конструкции измельчителей, измельченные продукты.

**Введение.** В последние десятилетия в зарубежной промышленности использование стеклобоя получило массовый характер. Его применяют в производстве листового и других видов стекла и стеклянных изделий, теплоизоляционного волокна и различных строительных материалов. Помимо очевидной экономии сырья, введение стекловолокна в состав стекольной шихты снижает температуру её плавления и уменьшает время варки, что позволяет экономить до 10% электроэнергии, затрачиваемой на процесс. Особое значение имеет вопрос утилизации отходов.

В Республике Беларусь стеклобой применяется относительно недавно, поэтому вопрос рациональной подготовки данного вида сырья, а именно его тонкий помол с минимальным удельным расходом электроэнергии, является актуальным для многих предприятий Беларуси. Стекло относится к высокоабразивным материалам средней прочности, не меняющим своих свойств с увеличением влажности. По данным предыдущих исследований [1–3], тонкое измельчение таких материалов целесообразно проводить в мельницах различных конструкций с шаровой загрузкой, а также в ударно-центробежных измельчителях [4; 5].

Таким образом, для исследования процесса тонкого помола стеклобоя были выбраны следующие помольные установки: три мельницы с шаровой загрузкой (вибрационная, барабанная шаровая и вертикальная центробежно-шаровая мельницы) и одна ударного действия (дисмембратор без классификационной камеры).

В качестве основных технико-экономических показателей работы дробильно-помольных машин выступают степень измельчения и удельный расход энергии на измельчение единицы объема (массы) готовой продукции. Кроме этого, большое значение имеет влияние различных конструктивных и технологических параметров измельчителя на энергоёмкость и качество помола в нем различных материалов. Например, для мельниц дезинтеграторного типа к таким параметрам можно отнести частоту вращения приводного вала, скорость подачи материала (производительность мельницы), диаметр загрузочного отверстия.

Цель представленных экспериментальных исследований – максимальный выход продукта фракцией 40...100 мкм. Эффективность помола оценивалась по фракционному составу, полученному на отсеивающей машине Retsch AS 200 с набором сит от 20 мкм до 2 мм. По полученным данным построены графики зависимости гранулометрического состава от режимных параметров измельчителей.

**Основная часть.** В качестве ударного измельчителя для исследований выбран дисмембратор – штифтовая бесситовая мельница с одним подвижным диском. Применяется как отдельно, так и в составе измельчающего агрегата, который комплектуется воздухоподводящим устройством, циклонами (отделителями паров, частиц, капель жидкости), конденсаторами, воздухоохладителями и т.п. [1; 4]. Преимущества дисмембратора заключаются в сравнительной простоте конструкции, компактности и удобстве регулирования рабочих параметров. В экспериментальной установке использовался дисмембратор с диаметром ротора 300 мм и частотой вращения вала до 6000 об/мин.

На рисунке 1 показан фракционный состав измельченного боя стекла при однократном ударном воздействии на обрабатываемый материал. Как видно из графика, несмотря на непрерывную работу мельницы, содержание фракции в готовом продукте более 100 мкм составляет около 69% по массе, а менее 40 мкм – не превышает 7%, т.е. происходит недоизмельчение исходного продукта. Увеличить долю годной фракции можно либо за счет установки классификационной камеры, либо увеличением частоты вращения ротора. Исходя из полученных экспериментальных данных, эту мельницу рекомендуется использовать для помола стеклобоя до граничного размера в конечном продукте, не превышающего 400 мкм.

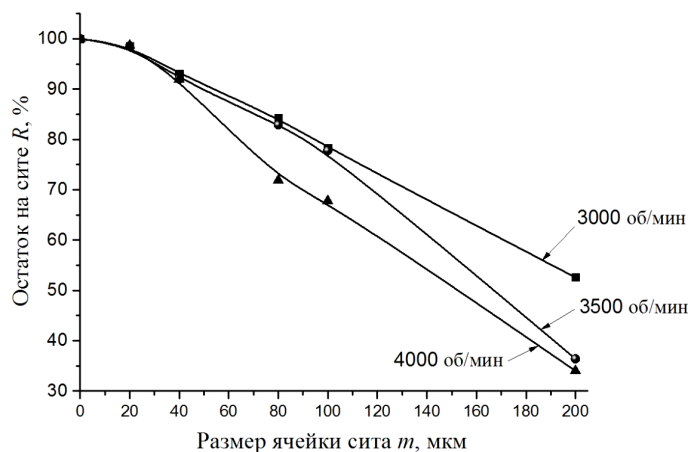


Рисунок 1. – Фракционный состав измельченного стекла при помоле в дисмембраторе

Из исследований по ударному измельчению материалов [4] известно, что многократное нагружение позволяет при снижении интенсивности воздействия (для данных мельниц это скорость вращения ротора) повысить выход требуемой фракции и в целом однородность продуктов измельчения по размеру [5]. Вследствие этого были проведены экспериментальные исследования многократного ударного измельчения стеклобой, результаты которых представлены в таблице 1.

Таблица 1. – Суммарный выход класса при многократном измельчении стеклобой в дисмембраторной мельнице

Размер ячейки сита, мм	1-я ступень помола, %	2-я ступень помола, %	3-я ступень помола, %
$n_p = 1200$ об/мин			
0,02	1,7	2,8	1
0,04	4,9	7,3	7,2
0,08	6,5	10	11,2
0,10	13,5	20	23,7
0,20	24,5	35,7	40
0,50	55,5	65,7	73,1
1,00	85,3	95,2	98,1
2,00	99	100	100
3,00	100	100	100
$n_p = 2000$ об/мин			
0,02	2,4	5,3	5
0,04	8	13,7	14,5
0,08	10,4	17,9	19,5
0,10	21,6	35,4	45
0,20	44	75	85
0,50	80,6	94,4	99
1,00	97,1	99,1	100
2,00	100	100	100
3,00	100	100	100
$n_p = 3500$ об/мин			
0,02	0,7	4	12
0,04	6,7	12,5	31,9
0,08	14,3	18,5	40
0,10	34,3	44,5	66,8
0,20	78	88	92
0,50	98	99	99
1,00	100	100	100
2,00	100	100	100
3,00	100	100	100

Исследования проводились на дисмембраторе с ротором диаметром 300 мм при частотах его вращения  $n_p$  1200, 2000 и 3500 об/мин. Стеклобой подавался порционно массой 1 кг на каждую стадию измельчения. После каждой стадии определялся фракционный состав измельченного продукта.

Полученные зависимости показывают, что после третьей стадии измельчения при выходе имеем сравнительно равномерный по крупности продукт с размером частиц около 0,2 мм. Это можно объяснить тем, что масса измельченных на первых стадиях частиц недостаточная, чтобы при постоянной скорости вращения ротора разогнаться и развить силу инерции, способную создать в частице разрушающие напряжения при ударе или истирании. Такие частицы не участвуют в процессе измельчения, а просто перемещаются с потоком воздуха и еще неразмолотым материалом. После каждой стадии этих частиц становилось все больше, и в конечном итоге почти все они имели схожие размеры.

Исследования процесса помола стекла проводились в различных типах мельниц, использующих шаровую загрузку, таких как вибрационная, барабанная шаровая и вертикальная центробежно-шаровая мельницы. Данные помольные машины разработаны и изготовлены на кафедре «Машины и аппараты химических и силикатных производств» Белорусского государственного технологического университета.

Научный эксперимент осуществлялся на базе *вибрационной мельницы* при фиксированной частоте вращения выходного вала  $1470 \text{ мин}^{-1}$ . При этом продолжительность однократного помола составляла 2,5...5,0 мин с шагом в 2,5 мин. В качестве загрузки использовались стальные цельпесы размером  $70 \times 45 \text{ мм}$ . Требовалось получить готовый продукт с фракционным составом 40...100 мкм.

Как видно из графика (рисунок 2), с увеличением времени помола остаток на сите 100 мкм по сравнению с ударным измельчением (см. рисунок 1) снижается, но все же имеет достаточно большое значение – порядка 57% и выше. В то же время из-за периодической работы мельницы с увеличением времени измельчения происходит и увеличение количества мелкой фракции (менее 40 мкм). Остаток на сите 40 мкм при этом достигает 21%. Эти экспериментальные данные свидетельствуют о нецелесообразности применения данного типа мельницы для получения узкой фракции 40...100 мкм при однократном измельчении.

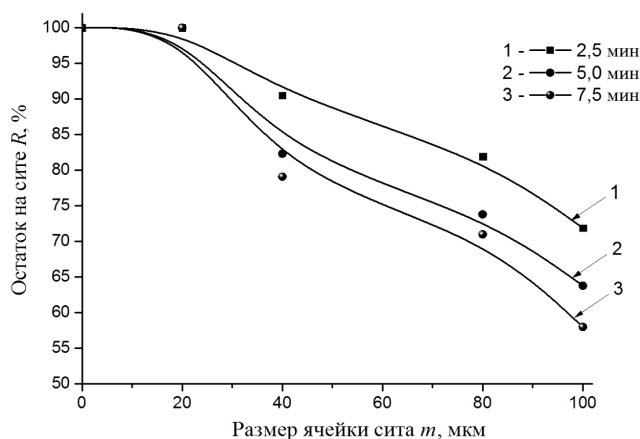


Рисунок 2. – Фракционный состав измельченного стекла при помоле в вибрационной мельнице

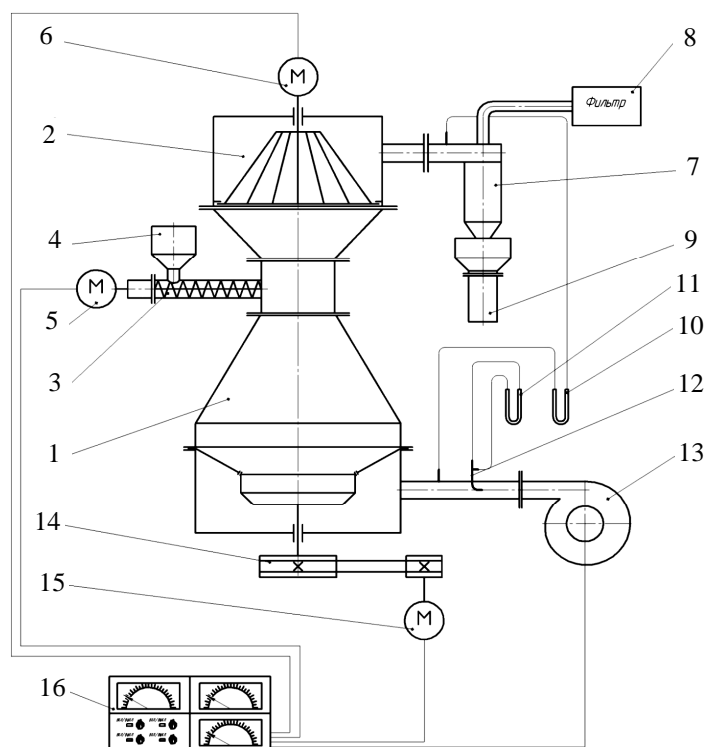
Следующей помольной машиной была выбрана *барабанная шаровая мельница* периодического действия. Эта конструкция широко используется во всех отраслях промышленности, особенно там, где требуется получить тонкий продукт при высокой производительности. В качестве мелющих тел использовались керамические цельпесы. Время помола – 2 часа. Фракционный состав продуктов помола стекла представлен графически на рисунке 3.



Рисунок 3. – Фракционный состав измельченного стекла при помоле в барабанной шаровой мельнице

Как видно из графика, в готовом продукте остаток на сите фракции 100 мкм составляет около 80%, что указывает на необходимость существенно увеличить длительность цикла. Однако при этом будет снижаться производительность мельницы и, безусловно, негативно скажется на промышленном производстве. Следовательно, для помола стеклобоя узконаправленного фракционного состава данный тип мельницы также не подходит.

Третьей мельницей с шаровой загрузкой была выбрана *вертикальная центробежно-шаровая мельница с классификатором*. Лабораторная установка представлена на рисунке 4. В качестве мелющих тел использовалась комбинированная загрузка стальных шаров диаметром 2,8...18 мм. Линейная скорость ротора составляла 11,6 м/с, скорость воздушного потока в кольцевом зазоре – 25 м/с, линейная скорость корзины классификатора – 4 м/с.



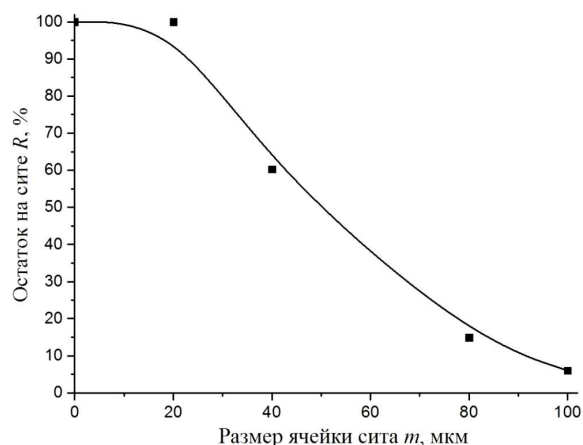
1 – вертикальная центробежно-шаровая мельница; 2 – классификатор; 3 – шнековый питатель; 4 – бункер; 5 – двигатель питателя; 6 – двигатель классификатора; 7 – циклон; 8 – фильтр; 9 – съемный стакан; 10, 11 – дифманометры; 12 – трубка Пито – Прандтля; 13 – центробежный вентилятор; 14 – ременная передача; 15 – двигатель привода мельницы; 16 – блок управления

Рисунок 4. – Схема экспериментальной установки

Вертикальная центробежно-шаровая мельница работает следующим образом. Посредством приводного вала придается вращение ротору с требуемой технологической скоростью. Из-за вращения ротора возникают центробежные силы, которые отбрасывают материал и мелющие тела к периферии ротора. Наличие конической части в роторе обеспечивает подъем материала и мелющих тел вверх по образующей цилиндра. Из-за подталкивания снизу материал и мелющие тела вылетают из ротора и отбрасываются по наклонному кольцу к цилиндрической части крышки. При уменьшении центробежной силы материал и мелющие тела сползают по кольцу вниз к ротору, где и получают ударный импульс от тел, расположенных на цилиндрической части ротора, за счет которого материал и мелющие тела поднимаются вверх и ударяются о коническую часть крышки, а затем возвращаются назад на ротор.

Материал в зону измельчения подается при помощи питателя из бункера через загрузочный патрубок. Измельчение осуществляется от раздавливающего усилия, возникающего за счет центробежной силы на цилиндрической части ротора, при помощи истирающего и ударного взаимодействия на кольце, при ударном воздействии на цилиндрической и конической частях крышки мельницы и при падении на ротор, а также ударно-истирающего воздействия при хаотическом движении материала и мелющих тел.

Измельченный материал при помощи воздушных потоков, подаваемых в мельницу через штуцер и поступающих в зону измельчения через концентрический зазор между ротором и кольцом, уносится в классификационную камеру и далее с необходимым фракционным составом через выходной патрубок поступает в циклон, а затем в фильтр для отделения от воздуха. Фракционный состав готового продукта представлен на графике (рисунок 5).



**Рисунок 5. – Фракционный состав измельченного стекла при помоле в вертикальной центробежно-шаровой мельнице**

Как видно, фракционный остаток на сите 100 мкм составляет всего 6%. Процентное содержание частиц менее 40 мкм – около 40%. Снизить содержание мелкой фракции в данном помольном агрегате можно, например, за счет уменьшения линейной скорости корзины классификатора. Таким образом, наиболее целесообразно применять для получения готового продукта с размером частиц 40...100 мкм вертикальную центробежно-шаровую мельницу. Доля годного продукта при этом составляет около 54%.

**Закключение.** Проведённый комплекс экспериментальных исследований показал, что использование ударных измельчителей для помола стеклобоя, в том числе многократного, весьма эффективно, особенно с точки зрения энергопотребления. Однако получить при этом тонкодисперсный продукт крупностью менее 200 мкм затруднительно. Тем не менее они могут быть использованы, например, при подготовке стеклобоя для шихты в стекловарении. Для получения продукта крупностью 100 мкм и менее целесообразно использовать шаровой помол, в частности одну из наиболее эффективных конструкций в этом сегменте – вертикальную центробежно-шаровую мельницу. Также следует отметить, что использование классификационной камеры при непрерывном режиме работы агрегата значительно увеличит производительность и снизит удельный расход электроэнергии.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Андреев, С.Е. Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых / С.Е. Андреев, В.А. Перов, В.В. Зверевич. – М. : Недра, 1980. – 415 с.
2. Богданов, В.С. Шаровые барабанные мельницы / В.С. Богданов. – Белгород : БелГТАСМ, 2002. – 258 с.
3. Боровский, Д.Н. Тонкое измельчение материалов малотоннажных производств в быстроходных центробежно-шаровых мельницах: автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.02.13 / Д.Н. Боровский ; Белорус. гос. технол. ун-т. – Минск, 2015. – 23 с.
4. Хопунов, Э.А. Селективное разрушение минерального и техногенного сырья (в обогащении и металлургии) / Э.А. Хопунов. – Екатеринбург : УИПЦ, 2013. – 429 с.
5. Гребенчук, П.С. Селективное измельчение материалов в центробежной мельнице многократного ударного нагружения : автореф. дис. ... канд техн. наук : 05.17.08 / П.С. Гребенчук ; Белорус. гос. технол. ун-т. – Минск, 2011. – 23 с.

Поступила 14.09.2017

#### FINE GRINDING OF GLASS IN MILLS OF VARIOUS CONSTRUCTIONS

**P. HREBIANCHUK, D. BOROVSKI**

*The dry grinding of glass cullet in the most effective designs of grinders is investigated. The problems of using cullet in the industry and the features of its grinding are analyzed. The designs of mills, which are principally different from each other and are supposed to be used for this purpose, are distinguished: dismembrator, vibratory, drum ball and vertical centrifugal-ball mills. The results of experimental studies on grinding cullet in them are presented. Based on the analysis of fractional composition of crushed products, recommendations are given on the use of these mills for grinding glass cullet.*

**Keywords:** mill, glass, the design of the crushers, the crushed products.

УДК 621.926.4

## УДАРНО-АБРАЗИВНОЕ ИЗНАШИВАНИЕ ЛОПАСТЕЙ РОТОРА ЦЕНТРОБЕЖНОЙ МЕЛЬНИЦЫ

д-р техн. наук, доц. П.Е. ВАЙТЕХОВИЧ

(Белорусский государственный технологический университет, Минск)

Проведен анализ абразивного износа лопастей ротора-ускорителя центробежной мельницы. В качестве расчетной принята модель Бекмана – Гоцмана, которая базируется на ударном воздействии абразивных частиц с металлической поверхностью лопастей. Установлено, что основными параметрами, влияющими на износ, являются скорость и угол атаки в момент соударения. Для определения указанных параметров составлена математическая модель движения частиц измельчаемого материала по поверхности диска. Решение задачи заключалось в построении траектории движения частиц до их соприкосновения с лопастями, при котором фиксировалась скорость и угол. С использованием скорости удара и угла атаки определена объёмная интенсивность износа.

**Ключевые слова:** центробежная мельница, ротор-ускоритель, лопасти, ударно-абразивное изнашивание.

**Введение.** Измельчители ударного действия, в том числе и ударно-центробежные, широко используются во многих отраслях промышленности. Их основные преимущества – простота конструкции, высокая степень измельчения, относительно низкие энергозатраты на проведение процесса. Ударные измельчители относятся к быстроходным агрегатам, которые характеризуются высокой интенсивностью взаимодействия с обрабатываемым материалом. С точки зрения повышения эффективности измельчения – это положительный факт, но одновременно каждый контакт абразивного материала с рабочим органом неизбежно приводит к его износу.

Износ как уменьшение массы, объема в большинстве агрегатов представляет больше экономическую, чем техническую проблему. Так, в тихоходных измельчителях, таких как барабанная (шаровая) мельница, износ на порядок выше, чем в ударных, по мере износа добавляется определенное количество измельчающих тел, и ресурс безостановочной работы исчисляется месяцами и годами. В ударных мельницах неравномерный износ нарушает балансировку быстровращающегося ротора. В результате возникают большие инерционные силы, создающие биения, вибрацию, что приводит к быстрому износу шеек валов, разрушению подшипников и конструкции агрегата в целом. По этой причине ресурс работы ударной мельницы между заменой ударных элементов ограничивается сотнями часов.

Всё сказанное выше свидетельствует о том, что при разработке и эксплуатации измельчителей ударного действия вопросам износостойкости необходимо уделять большое внимание. Это в полной мере относится и к ударно-центробежным мельницам, и дробилкам, выпускаемым в Беларуси [1].

Очевидно, что для успешного решения обозначенных проблем следует глубоко изучить физическую сущность *процесса износа*. Приоритет в этом направлении принадлежит советскому специалисту И.В. Крагельскому [2]. Но наиболее основательно износ в измельчителях ударного действия изучал И.Р. Клейс [3]. Он провел анализ большого количества работ по исследованию абразивного износа этих агрегатов, отметил основные факторы, влияющие на его интенсивность, дал критическую оценку расчетных моделей этого процесса. Преобладающая часть рассмотренных моделей основана на ударном воздействии абразивных частиц с металлической поверхностью рабочих органов машин. Среди них по глубине проработки, учёту максимального количества факторов отличается модель износа Бекмана – Гоцмана [4]. Эта модель начала широко использоваться многими специалистами, в том числе и Крагельским [5]. В связи с этим при разработке метода расчета абразивного износа лопастей ротора-ускорителя центробежной мельницы будем руководствоваться именно этой моделью.

**Основная часть.** Сущность модели Бекмана – Гоцмана заключается в том, что при ударе частицы о поверхность на ней образуется лунка (рисунок 1).

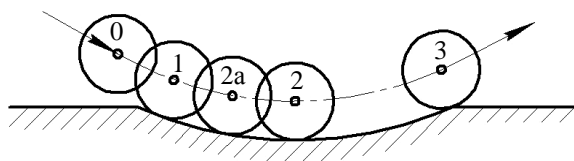


Рисунок 1. – Схема контактирования частицы с поверхностью

Когда частица проникает в основное тело, её центр перемещается по криволинейной траектории, которую можно разделить на несколько участков: 0–1 – *упругая деформация* с возможным восстановлением;



1–2а – пластическая деформация, когда частица совершает только деформационную работу; 2а–2 – пластическая деформация с энергией деформирования и трения – начало удаления продукта износа.

На этих стадиях в результате пластической деформации локальная температура металла достигает температуры плавления. В точке «2» частица полностью теряет свою нормальную составляющую скорости и продолжает перемещаться за счет касательной. При этом на участке 2–3 частица совершает работу деформации, сопровождаемую сдвигом слоев и выносом расплавленного металла из лунки.

В работе [4], как и большинству других [2; 3], в качестве основной характеристики абразивного изнашивания поверхности принята объемная интенсивность износа:

$$W = \frac{\Delta V}{m}, \frac{\text{мм}^3}{\text{кг}}, \quad (1)$$

где  $\Delta V$  – уменьшение объема образца за время опыта,  $\text{мм}^3/\text{с}$ ;  $m$  – масса абразива, ударившегося об образец за это время,  $\text{кг}/\text{с}$ .

Из физической модели Бекмана – Гогмана ясно, что механизм удаления из лунки продукта изнашивания на стадиях 2а–2 и 2–3 разный. Поэтому формула, предложенная ими для расчета объемной интенсивности износа, включает два слагаемых, каждое из которых соответствует определенной стадии:

$$W = \frac{3}{4\pi\rho_c e_s^*} (\tau_{s1} I_1 + \tau_{s2} I_2), \quad (2)$$

где  $\rho_c$  – плотность среды (абразива),  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $e_s^*$  – плотность энергии среза,  $\text{Дж}/\text{м}^3$ ;  $\tau_{s1}$  и  $\tau_{s2}$  – прочность адгезионных связей на срез для соответствующих стадий,  $\text{Па}$ ;  $I_1$  и  $I_2$  – параметры, характеризующие изменения поверхности при срезе, отнесенной к объёму частицы,  $\text{м}^2/\text{м}^3$ .

Заметим, что первое слагаемое в уравнении (2) отражает деформационный (хрупкий), а второе – пластический износ.

Авторами в работе [4] представлен развернутый вариант математического описания модели износа, где приведены формулы для расчета всех параметров, входящих в уравнение (2). Большинство из них зависит от глубины лунки. Вместе с тем для изнашиваемых поверхностей, выполненных из материалов с высоким модулем упругости и высокой плотностью, что характерно для всех конструкционных металлов, предложена упрощенная модель и ее математический аппарат.

Для расчета износа по этой модели вводится дополнительный параметр

$$\varphi = \nu \left( \frac{2\rho_c}{3HB} \right)^{1/2}, \quad (3)$$

где  $\nu$  – скорость частицы в момент удара,  $\text{м}/\text{с}$ ;  $HB$  – твердость поверхности металла,  $\text{Па}$ .

С использованием этого параметра определяются все остальные, входящие в уравнение (2).

Так, прочность адгезионных связей

$$\tau_{s1} = \tau_0 + \left( \frac{\varphi \sin \alpha}{2} \right)^{1/2} HB, \quad (4)$$

$$\tau_{s2} = \tau_0 + \left( \frac{2\varphi \sin \alpha}{1 - \varphi \sin \alpha} \right)^{1/2} HB, \quad (5)$$

где  $\alpha$  – угол атаки при ударе;  $\tau_0$  – прочность адгезионных связей на срез при отсутствии силы давления.

Величина  $\tau_0$  является характеристикой материала, из которого изготовлен изнашиваемый узел. Для материалов с основным компонентом в качестве железа  $\tau_0 = 1320 \text{ МПа}$ .

Параметры, характеризующие изменение относительной поверхности при срезе, рассчитываются по следующим формулам:

$$I_1 = 6,81\varphi^{5/2} \cos^2 \alpha \cdot \sin^{1/2} \alpha, \quad (6)$$

$$I_2 = 0,65\varphi^2 \cdot \sin^2 \alpha, \quad (7)$$

Оставшаяся неопределенной в уравнении (2) плотность энергии среза – это тоже константа изнашиваемого материала. Её можно определить по формуле:

$$e_s^* = k_1 L \rho_m, \quad (8)$$

где  $\rho_m$  – плотность металла;  $L$  – теплота плавления металла;  $k_1$  – эмпирический коэффициент, который определяется по номограмме [4].

Для материала Ст. 3  $e_s^* = 46500 \text{ МПа}$ .

Из всех расчетных зависимостей (3)–(7) видно, что основными параметрами, влияющими на износ, являются угол атаки  $\alpha$  и скорость  $v$  абразивных частиц в момент удара.

Определение указанных параметров – это отдельная задача механики движения частиц по вращающемуся диску. Исходя из опыта решения подобных задач [6], непосредственно для ударно-центробежной мельницы алгоритм решения такой задачи представлен в одной из последних работ [7].

Ротор-ускоритель ударно-центробежных мельниц включает диск, на котором укреплены лопасти [1]. Схема установки лопастей может быть различной. Так, прямолинейные лопасти могут укрепляться радиально и тангенциально, причем тангенциальное расположение реализуется обычно в двух вариантах: повернутых вперед по ходу вращения ротора и назад против него.

Центральная зона диска служит для равномерного распределения материала. В отдельных случаях здесь устанавливается конус-распределитель.

Частицы материала на выходе из зоны распределения находятся в разных точках 1–3 (рисунок 2) сектора, образованного соседними лопастями. Естественно, что траектории движения по диску у них тоже будут разными. Ближайшие частицы будут сразу прижиматься к лопастям и передвигаться вдоль их со скольжением [8]. При увеличении начального угла расположения частиц они пройдут некоторое расстояние по диску, ударятся о лопасть и продолжат движение вдоль нее.

Траектория перемещения частиц и необходимые значения скорости соударения и угла атаки определялись [7] с использованием уравнения относительного движения:

$$m\overline{a}_d = \overline{F}_m + \overline{F}_e + \overline{F}_c, \quad (9)$$

где  $a_d$  – ускорение относительного движения, м/с<sup>2</sup>;  $F_m$  – сила трения, Н;  $F_e$ ,  $F_c$  – инерционные переносная и кориолисова силы, Н.

Решение этой задачи рассмотрим на примере ротора с радиальными лопастями (рисунок 2).

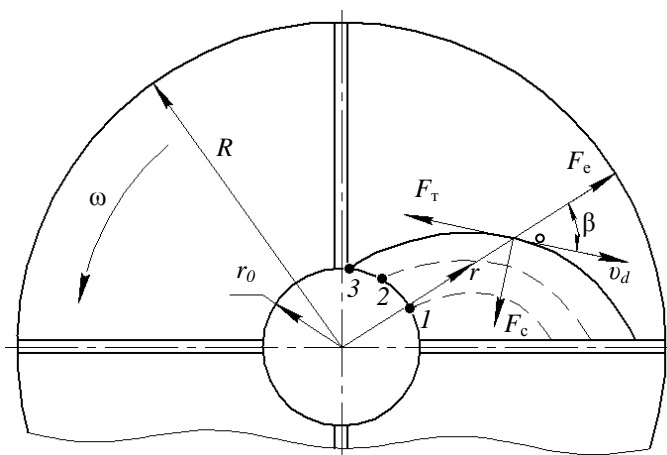


Рисунок 2. – Расчетная схема для определения траектории движения частиц

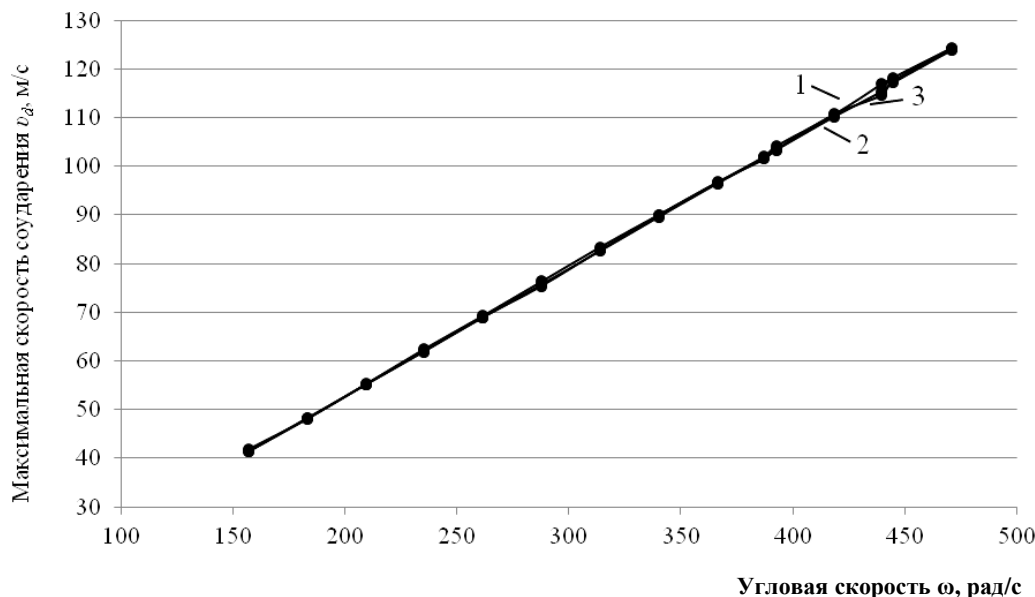
Уравнения движения в проекциях на оси полярной системы координат имеют вид:

$$\begin{cases} \ddot{r} - r(\ddot{\phi})^2 = -fg \frac{\dot{r}}{\sqrt{(\dot{r})^2 + (r\dot{\phi})^2}} - 2\omega r\dot{\phi} + \omega^2 r; \\ r\ddot{\phi} + 2\dot{r}\dot{\phi} = -fg \frac{\dot{r}}{\sqrt{(\dot{r})^2 + (r\dot{\phi})^2}} + 2\omega\dot{r}, \end{cases} \quad (10)$$

где  $r$ ,  $\dot{r}$ ,  $\ddot{r}$  – радиальная координата и ее производные;  $\phi$ ,  $\dot{\phi}$ ,  $\ddot{\phi}$  – угловая координата и ее производные;  $f$  – коэффициент трения частиц по диску;  $\omega$  – угловая скорость ротора.

Расчет по уравнениям (10) проводился для ротора радиусом  $R = 230$  мм, начальным радиусом установки лопастей  $R_0 = 80$  мм в диапазоне угловых скоростей  $\omega = 150 \dots 470$  рад/с. Начальный угол расположения частиц в межлопастном пространстве (см. рисунок 2) принимался 30, 60, 90 град.

Для определения износа важна максимальная скорость соударения, которая будет достигаться при начальном расположении частицы на наибольшем удалении от лопасти, характеризуемом углом 90 град (точка 3, см. рисунок 2). Её изменение в зависимости от угловой скорости для всех трех схем расположения лопастей показано на рисунке 3.



1 – радиальные; 2 – повернутые вперед; 3 – повернутые назад

Рисунок 3. – Зависимость скорости соударения от угловой скорости ротора

Для всех схем установки лопастей относительная скорость при указанном начальном угле в исследуемом диапазоне угловых скоростей изменяется в пределах 41...124 м/с.

Для разных схем установки лопастей её значения отличаются не более чем на 1,0 м/с, что на графике при выбранном масштабе преобразовалось в одну линию (см. рисунок 3).

Радиус контакта частиц с лопастями практически не зависит от угловой скорости ротора, а определяется только их начальным расположением. В общем случае ударное воздействие частиц на лопасти происходит по всей их длине. Контакт наиболее удаленной в начальный момент частицы с радиальной лопастью осуществляется на радиусе 172 мм, с повернутой вперед – 186 мм. Далее они движутся направленно вдоль лопасти. В конструкции ротора с лопастями, повернутыми назад, контакт частиц с ними достигается только при низких угловых скоростях – до 235 рад/с. При дальнейшем увеличении угловых скоростей они вылетают из ротора без соударения с лопастями. В этой связи третья конструктивная схема с точки зрения ударно-абразивного износа не представляет большого интереса.

Угол атаки частиц увеличивается вместе с первоначальным отдалением их от лопасти на 23...31 град, но не изменяется при повышении угловой скорости ротора с радиальными лопастями. Идентично его изменение и при повороте лопасти вперед по ходу вращения. Только диапазон изменения угла при этом составляет 56...76 град.

Для первых двух конструктивных схем с уменьшением начального угла расположения частицы уменьшаются все выходные параметры: скорость соударения, угол атаки. Следует ожидать, что при этом будет уменьшаться и интенсивность износа.

Для подтверждения сказанного предположения проведем её расчет по уравнениям (2)...(7). Примем недостающие для расчета параметры: плотность кварцевого песка –  $\rho_c = 2640 \text{ кг/м}^3$ ; твердость стали Ст 3 –  $HV = 1300 \text{ МПа}$ .

Результаты расчета для ротора с радиальными лопастями представлены на рисунке 4 в виде графической зависимости  $W = f(\omega)$ , из которой видно, что при увеличении угловой скорости вместе с ростом относительной скорости (см. рисунок 3) повышается и абразивный износ. Например, при начальном угле расположения частиц, равном 90 град, он максимален и изменяется в пределах 61...100 мм<sup>3</sup>/кг. Приближение частицы к лопасти в начальный момент (30 и 60 град) ведет к снижению скорости соударения, а соответственно и к интенсивности износа.

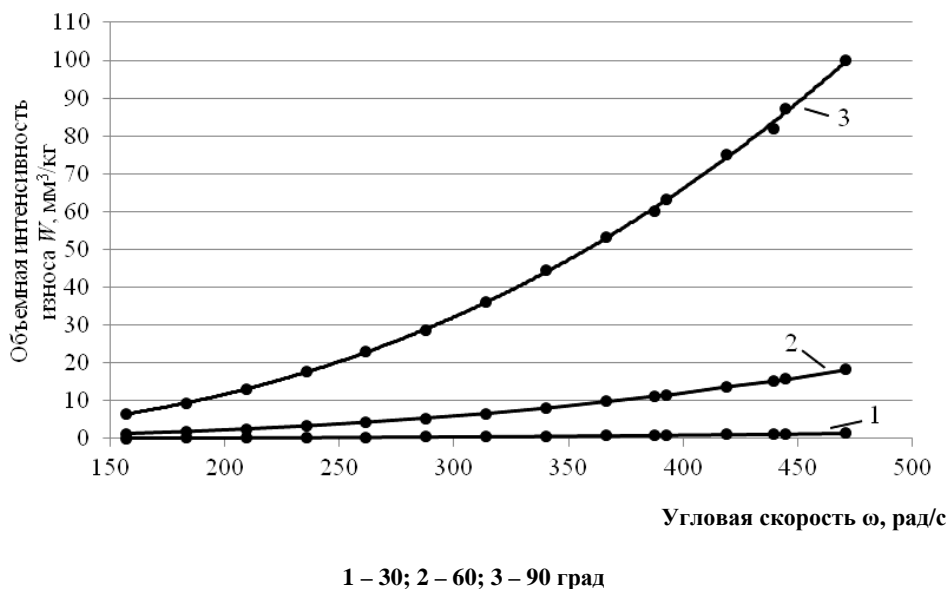


Рисунок 4. – Зависимость объемной интенсивности износа от угловых скоростей ротора

Сравнение двух первых конструкций роторов по величине интенсивности износа при начальном угле атаки  $\alpha = 90$  град показывает (рисунок 5), что при повороте лопастей вперед по ходу вращения он несколько ниже.

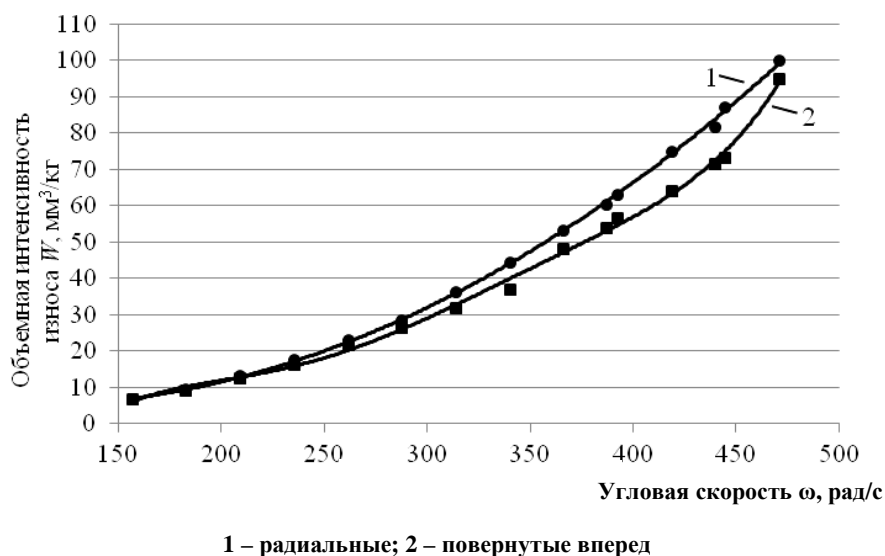


Рисунок 5. – Сравнение конструктивных вариантов роторов по интенсивности износа

Следует отметить, что величина интенсивности износа, рассчитанного по предлагаемой методике, меньше полученного экспериментальным путем [9]. Скорее всего, это обусловлено дополнительным износом за счет истирающего эффекта при движении частиц после соударения вдоль лопасти. Последнее говорит о необходимости дальнейшего совершенствования модели расчета абразивного износа лопастей с учетом истирания.

**Заключение.** Работа посвящена созданию методики расчета абразивного износа лопастей ротора-ускорителя центробежной мельницы. На основе анализа методик расчета интенсивности износа для этого агрегата за базовый вариант принята модель Бекмана – Гоцмана с её математическим описанием, которая заключается в учете ударного воздействия абразивных частиц с металлической поверхностью.

Установлено, что определяющими факторами, влияющими на величину износа, являются скорости соударения частиц с поверхностью и угол атаки.

Рассмотрен и реализован метод определения этих параметров при соударении частиц с лопастями ротора, основанный на решении дифференциальных уравнений при их движении в межлопастном про-

странстве. По полученным значениям скорости и угла атаки рассчитана интенсивность износа лопастей для трех конструктивных вариантов, отличающихся схемой их установки. Сравнение экспериментальных и расчетных данных износа показало, что величина последнего несколько меньше.

Таким образом, можно сделать вывод о необходимости совершенствования методики расчета интенсивности износа в направлении дополнительного учета истирающего эффекта.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Бароха, Э.Л. Центробежные дробилки и мельницы ударного типа / Э.Л. Бароха, В.В. Воробьев, А.В. Горобец // Центробежная техника – высокие технологии : материалы 3-й междунар. науч.-техн. конф. ; ОАО «НПО Центр». – Минск, 2008. – С. 5–15.
2. Крагельский, И.В. Трение и износ / И.В. Крагельский. – М. : Машиностроение, 1968. – 480 с.
3. Клейс, И.Р. Износостойкость элементов измельчителей ударного действия / И.Р. Клейс, Х.Х. Ууэймыс. – М. : Машиностроение, 1986. – 286 с.
4. Beckmann, G. Analytical model of the blast wear intensity of metal based on a general arrangement for abrasive wear / G. Beckmann, J. Gotzmann // Wear. – 1981. – Vol. 73. – P. 325–353.
5. Kragelsky, I.V. Theory of material wear by solid particle impact – a review / I.V. Kragelsky, A.I. Zolotar, A.O. Sheiwekhman // Tribology international. – 1985. – Vol. 18, № 1. – P. 3–11.
6. Вайтехович, П.Е. Интенсификация и моделирование процессов диспергирования в поле инерционных сил / П.Е. Вайтехович. – Минск : БГТУ, 2008. – 220 с.
7. Вайтехович, П.Е. Модель движения материала в роторе-ускорителе центробежно-ударной дробилки / П.Е. Вайтехович, П.С. Гребенчук, А.В. Таболич // Труды БГТУ. Химия и технология неорганических веществ. – 2014. – № 3. – С. 102–105.
8. Влияние конструктивных особенностей ротора на скорость измельчаемого материала в центробежно-ударных дробилках / П.Е. Вайтехович [и др.] // Горная механика и машиностроение. – 2017. – № 2. – С. 54–63.
9. Таболич, А.В. Конструкционные возможности повышения износостойкости ускорителей центробежно-ударных мельниц / А.В. Таболич, С.Н. Бондаренко // Горная механика и машиностроение. – 2016. – № 2. – С. 71–77.

Поступила 20.11.2017

#### SHOCK – ABRASIVE WEAR OF ROTOR BLADES CENTRIFUGAL MILL

*P. VAYTEKHOVICH*

*The analysis of abrasive wear of the blades of the rotor-accelerator centrifugal mill is given. As a design a model Beckman – Gotsman is adopted, this model is based on the impact of abrasive particles with the metal surface of the blades. It is established, that the main parameters affecting wear are the speed and angle of attack at the moment of impact. For the definition of these parameters a mathematical model of motion of particles of crushed material on the surface of the disk. The solution to the problem was to build the trajectory of the particles prior to their contact with the blades, wherein the fixed speed and angle. Using the impact velocity and angle of attack determined volumetric wear intensity.*

**Keywords:** centrifugal mill, rotor-accelerator, blades, shock-abrasive wear.

УДК 621.7:621.9:621.3:62-4:62-5:62-9

**ЛЕНТОЧНЫЙ ШЛИФОВАЛЬНЫЙ ИНСТРУМЕНТ С ОРИЕНТИРОВАННЫМ РЕЛЬЕФОМ  
АБРАЗИВОСОДЕРЖАЩЕГО ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ****А. С. КИРИЕНКО***(Полоцкий государственный университет)*

*Рассматривается возможность прогнозирования эксплуатационных характеристик инструмента на стадии проектирования и достижения необходимых параметров при его изготовлении и последующей эксплуатации, представляющая интерес для разработчиков гибких шлифовальных инструментов. Демонстрируются научно обоснованные и экспериментально подтвержденные способы управления формированием ориентированных структур и значений углов ориентирования зерен абразива в рабочих поверхностях гибких инструментов, используемых для шлифования различных конструкционных материалов. Представлены результаты аналитической оценки макроскопических исследований, процесса резания ориентированным зерном и исследований износостойкости полученных образцов ленточного шлифовального инструмента с углами ориентированности 0, 10, 20, 40, 60° зерен электрокорунда 14А относительно тканевой основы.*

**Ключевые слова:** абразивные материалы, рельеф поверхностного слоя, ориентированность зерен абразива, электростатическое поле, макроскопические исследования, производительность шлифовального инструмента.

**Введение.** Технология шлифовальной обработки гибким инструментом – достаточно трудоемкий процесс, параметры которого взаимосвязаны с характеристиками рельефа поверхности абразивного слоя инструмента. Формирование рельефа абразивного слоя при получении гибкого шлифовального инструмента известными методами приводит к необоснованному расходу дорогостоящего абразивного материала и получению рабочей поверхности многослойных или однослойных покрытий с хаотично расположенными зёрнами абразива, об эффективности обработки которыми можно говорить лишь с учетом некоторых среднестатистических величин [1; 2]. Для увеличения производительности шлифовальной обработки необходимо стабилизировать условия резания в зоне контакта поверхности детали и зерен абразива [3; 4]. Анализ работ, посвященных этим вопросам, позволил установить, что в поведении единичного абразивного зерна применительно к процессам эластичного шлифования наблюдаются закономерности. Выявлена зависимость глубины внедрения зерна от нагрузки на шлифующее зерно, температуры в зоне резания и режимов шлифования, длины кривой контакта, характеристических размеров и формы самого зерна, рельефа рабочей поверхности шлифовального инструмента [4]. Однако результаты этих работ не дают ответа, каким образом можно стабилизировать условия резания при эластичном шлифовании. При использовании существующих конструкций эластичных шлифовальных инструментов с произвольным расположением абразивного зерна достигнуть этого невозможно. В работах, посвященных вопросам формообразования структур и рельефа поверхностей шлифовальных инструментов, прослеживается зависимость между определенным образом сориентированными зёрнами в поверхностных слоях абразивосодержащих инструментов, геометрия которых влияет на напряженно-деформированное состояние абразивных зерен при шлифовании, и эксплуатационными характеристиками самого инструмента [5; 6]. В связи с этим сформулировано предположение, что сориентированные определенным образом зёрна в абразивосодержащем поверхностном слое обладают повышенной изнашивающей способностью, поскольку резание материала происходит по достаточно хорошо изученным законам лезвийной обработки [7; 8]. В настоящее время известен и описан характер влияния рельефа и макроструктуры поверхностного слоя шлифовального инструмента на его долговечность, производительность и другие характеристики. Однако отсутствуют научно обоснованные и экспериментально подтвержденные способы управления формированием ориентированных структур и значений углов ориентирования дисперсных абразивных порошков в рабочих поверхностях абразивосодержащих инструментов, используемых для шлифования различных конструкционных материалов [7; 8].

С целью управления поведением шлифовальных материалов при формировании рельефа поверхностного слоя для регулирования физико-механических и эксплуатационных свойств гибких инструментов проведены исследования и реализован научно обоснованный способ электростатического нанесения абразивосодержащих слоев. Это явилось условием для реализации научной задачи, направленной на разработку способа ориентированности абразивных зерен в рабочей поверхности эластичного шлифовального инструмента, для повышения его износостойкости и режущей способности, а также производительности шлифовальной обработки. Эластичный шлифовальный инструмент с регулированием ориентированности зерен абразива сможет заменить дорогостоящие абразивные инструменты на гибкой основе

с произвольным расположением синтетического алмаза, эльбора и других сверхтвердых материалов за счет направленного использования физико-механических свойств недорогих марок абразива [8; 9].

**Основная часть.** Сформулировав предположение о регулировании ориентированности зерен абразива воздействием электростатического поля, проведено исследование шлифовальных порошков различных материалов по критерию восприимчивости к воздействию электростатическим полем, в результате чего наиболее оптимальным абразивным материалом для нанесения ориентированных абразиво-содержащих поверхностных слоев гибкого шлифовального инструмента с ориентацией зерен выбран электрокорунд [8; 10]. Оптимальные размеры зерен абразива и параметров электростатического нанесения определялись на экспериментальной установке. Вертикально расположенным генератором электростатического поля на бумажную ленту с равномерным слоем клея марки ПВА, последовательно повернутую на углы, составляющие 0, 10, 20, 40, 60°, наносили шлифовальный порошок электрокорунда 14А с размером зерен 0,63, 0,40 и 0,20 мм. Полученные образцы подвергались сушке на открытом воздухе. При микроскопическом исследовании полученных образцов абразиво-содержащих слоев отчетливо видна ориентированность зерен абразива по своей наибольшей оси, в отличие от хаотично расположенных зерен абразива в образцах покрытий, полученных методом механической насыпки (рисунки 1, 2).



Рисунок 1. – Образец покрытия с ориентированными зернами абразива

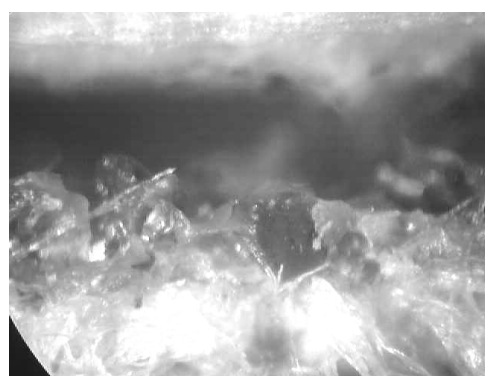


Рисунок 2. – Образец покрытия с неориентированными зернами абразива

Условившись, что число всех абразивных зерен видимой через окуляр площади составляет 100%, определили долю ориентированных зерен каждого исследуемого образца. Результаты вычислений процентного соотношения ориентированности абразива представлены в таблице 1.

Таблица 1. – Ориентированность зерен абразива в поверхностных абразиво-содержащих слоях исследуемых образцов ленточного шлифовального инструмента, %

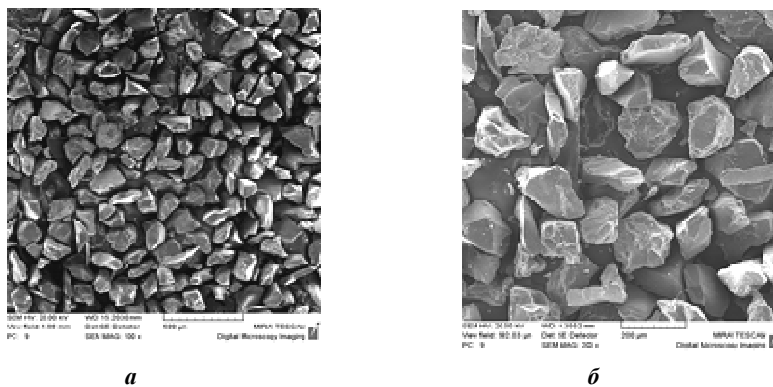
Угол ориентированности зерен абразива, относительно тканевой основы, град	Ориентированность зерен абразива в поверхностных абразиво-содержащих слоях, %		
	при размерах абразивного материала, мм		
	0,20	0,40	0,63
0	93	89	86
10	85	78	75
20	80	66	60
40	68	50	40
60	39	32	20

Из таблицы видно, что в образцах покрытий с зернами электрокорунда фракции 0,20 мм количество сориентированных под разными углами зерен выше в сравнении с образцами, содержащими зерна фракций 0,40 и 0,63 мм. Анализ полученных результатов позволил сделать следующие *выводы*:

- 1) электростатическое поле оказывает влияние на ориентированность зерен абразива в покрытии, при этом их концентрация и ориентированность зависит от направления вектора напряженности поля;
- 2) наибольшие глубина и концентрация зерен абразива достигается при вертикальном направлении вектора напряженности электростатического поля к поверхности тканевой основы при угле ее поворота 0°;
- 3) уменьшение угла между вектором напряженности электростатического поля и поверхностью образца приводит к уменьшению угла между наибольшей осью зерна абразива и поверхностью образца, а также снижению концентрации абразива в рабочем слое и глубины его проникновения в клеевой слой. При этом отмечается увеличение разности между этими углами на 2...4°;

4) зерна меньшего размера при одних и тех же параметрах электростатического поля в среднем проникают на меньшую глубину, и их концентрация меньше, чем у более крупных зерен. Это можно объяснить их более низкой кинетической энергией.

Макроскопические исследования рельефа однослойных поверхностей полученных абразиво-содержащих покрытий изготовленных образцов гибкого шлифовального инструмента (рисунок 3) показали, что видимой анизотропии расположения зерен абразива не наблюдается.

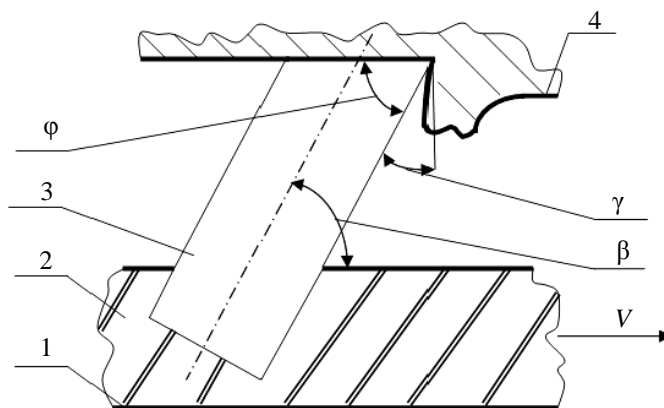


*a* – увеличение  $\times 100$ ; *б* – увеличение  $\times 200$

**Рисунок 3. – Образцы рельефа однослойной рабочей поверхности с ориентированными зернами абразива ленточного шлифовального инструмента, полученного электростатическим нанесением абразива с углом ориентированности зерен абразива  $\beta = 0^\circ$**

В ходе детального исследования рельефа полученных образцов эластичного шлифовального инструмента и обработки полученных результатов приходим к выводу, что зерна абразива, закрепленные в клеевой основе, ориентируются при их перемещении в электростатическом поле к основе, повернутой на определенный угол, в отличие от их хаотического расположения в традиционных шлифовальных инструментах. Ориентированность абразивного зерна в исследуемых образцах покрытий составила 85...90%. По итогам проведенных экспериментов определено, что на получаемый рельеф абразивосодержащего покрытия, концентрацию, плотность нанесенного слоя, ориентированность зерен абразива в покрытии влияют физические свойства наносимых абразивных порошков и угол нанесения абразивного зерна. Оптимальный диапазон углов ориентированности абразивных зерен от 0 до  $20^\circ$ . Внедрение в вязкую основу происходит равномерно, поэтому при производстве гибкого абразивного инструмента необходимо также учесть наиболее рациональные значения углов для шлифования различных по своим свойствам материалов [11; 12].

Рассматривая зерно абразива, участвующее в процессе шлифовальной обработки, можно рассчитать изменение площади фактического контакта в зависимости от угла ориентированности зерна относительно обрабатываемой поверхности в соответствии со схемой, приведенной на рисунке 4.



1 – тканевая основа; 2 – клеевая связка; 3 – ориентированное абразивное зерно;  
4 – обрабатываемая поверхность;  $\varphi$  – угол при вершине зерна;  
 $\gamma$  – передний угол резания;  $\beta$  – угол ориентированности абразивного зерна

**Рисунок 4. – Схема резания ориентированным зерном абразива**

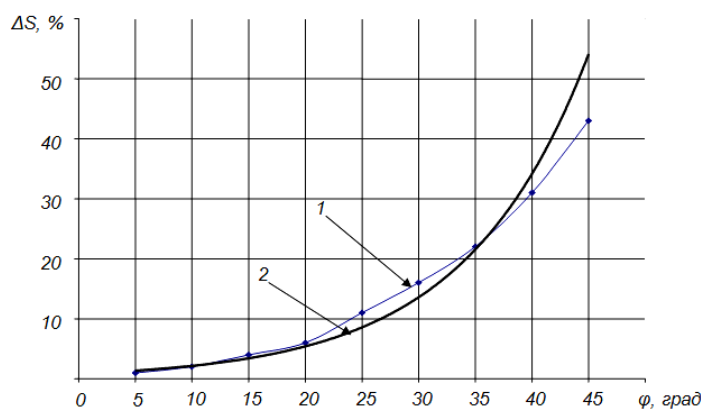


При реализации данной схемы величина фактической площади контакта зерна изменяется в соответствии с соотношением

$$S_{op} = \frac{S_{nom}}{\cos \varphi},$$

где  $S_{op}$  – фактическая площадь контакта зерна, ориентированного под углом  $\beta$  относительно основы;  $S_{nom}$  – номинальная площадь зерна абразива;  $\varphi$  – угол при вершине, равный  $\beta$  – углу ориентированности абразива относительно основы.

Результаты аналитического расчета изменения площади контакта и плеча силы резания в зависимости от изменения угла ориентированности абразива относительно обрабатываемой поверхности и экспериментальная кривая представлены на рисунке 5.



1 – экспериментальная зависимость; 2 – теоретическая зависимость

Рисунок 5. – Зависимость относительного приращения площади контакта  $\Delta S$  частицы от изменения угла ориентированности абразива  $\beta$  относительно основы

Для оценки фактической площади контакта поверхности шлифовальной ленты проведены микроскопические исследования с последующим фотографированием поверхностей реза и анализа фотоотпечатков. Площадь фактического контакта определяли измерением площади поверхности контактирующих зерен абразива с обрабатываемой поверхностью.

Анализируя результаты, приходим к выводу, что изменение рельефа поверхности и угла ориентированности зерен абразива относительно основы от 0 до 40° приводит к увеличению производительности шлифовальной обработки в 1,3...1,5 раза, что является весьма ощутимым резервом использования традиционных малоефективных абразивных материалов для шлифовальной обработки твердых наплавов, сварных швов и т.п. [12; 13]. Это также подтверждают результаты исследования износостойкости экспериментальных образцов ленточного шлифовального инструмента из электрокорунда 14А размером зерен 0,20 мм, полученных методом электростатического нанесения с углами ориентированности зерен абразива 0, 10, 20, 40, 60° и путем сравнения полученных экспериментальных показателей с нормативными значениями ГОСТ 5009-82 [10]. График зависимости износостойкости образцов покрытий от угла ориентированности зерен абразива показан на рисунке 6.

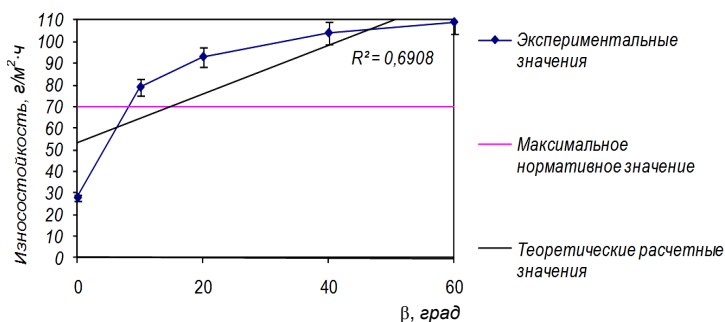


Рисунок 6. – Влияние рельефа поверхности и угла ориентированности  $\beta$  зерен абразива размером 0,20 мм относительно основы в абразивосодержащих образцах покрытий на их износостойкость

Результаты исследования износостойкости экспериментальных образцов покрытий с различным рельефом и углами ориентированности зерен абразива свидетельствуют: показатель износостойкости уменьшается с приближением значений угла ориентированности абразива в покрытии к  $0^\circ$ , т.е. у покрытий с перпендикулярно закрепленными зернами абразива относительно поверхности основы износостойкость ниже по сравнению с покрытиями с наклонным расположением зерен абразива.

Сравнение экспериментальных значений с нормативными показателями выявило, что износостойкость покрытий с ориентированностью зерен абразива под углом  $0^\circ$  ниже в 1,2 раза, а покрытий с ориентированностью зерен абразива под углами 20, 40,  $60^\circ$  в среднем в 1,3...1,5 раза выше [13; 14].

**Заключение.** При проведении исследований выявлены новые представления о способе формирования ориентированной макроструктуры и рельефа поверхностей гибких шлифовальных инструментов. Аналитически решена задача по нахождению оптимальных параметров формообразования в электростатическом поле ориентированной макроструктуры и рельефа абразивосодержащих слоев шлифовальных инструментов, являющихся условием повышения их износостойкости и режущей способности.

В результате статистической обработки данных исследований рельефа рабочих поверхностей образцов установлено влияние направления вектора напряженности электростатического поля под углами 20... $40^\circ$  к основе на ориентированность 85...90% абразивных зерен в слое, а также зависимость между увеличением угла ориентированности зерен абразива и снижением концентрации абразива в рабочем слое, глубины их проникновения в слой.

Экспериментально доказано, что рельеф абразивосодержащего поверхностного слоя покрытия из ориентированных под углами 20... $60^\circ$  зерен электрокорунда 14А в образцах эластичных шлифовальных инструментов способствует увеличению износостойкости таких поверхностей в 1,3...1,5 раза в сравнении с традиционными эластичными инструментами.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Кремень, З.И. Технология шлифования в машиностроении / З.И. Кремень, В.Г. Юрьев, А.Ф. Бабошкин ; под общ. ред. З.И. Кременя. – СПб. : Политехника, 2015. – 424 с.
2. Мрочек, Ж.А. Процессы шлифования в машиностроении : учеб. пособие / Ж.А. Мрочек, М.Г. Киселев, Л.М. Кожуро. – М. : Инфра-М, Новое знание, 2013. – 358 с.
3. Malkin, S. Grinding Technology: Theory and Applications of Machining with Abrasives / S. Malkin, Ch. Guo. – New York : Industrial Press Inc, 2008. – 372 p.
4. Никифоров, И.П. Роль внешнего и внутреннего трения в процессе микрорезания абразивным зерном / И.П. Никифоров, П.Н. Мальцев // Вестн. Псков. гос. ун-та. Сер. Экономические и технические науки. – 2012. – № 1. – С. 116–123.
5. Lynch, A.J. The History of Grinding / A.J. Lynch, C.A. Rowland // Metallurgy, and Exploration : Electronic edition published, 2009. – 218 p.
6. Никифоров, И.П. Состояние и перспективы производства абразивных материалов / И.П. Никифоров // Труды ППИ. Сер. Машиностроение. Электротехника. – 2012. – № 15.3. – С. 265–270.
7. Завистовский, С.Э. Моделирование процесса электростатического осаждения абразивных покрытий / С.Э. Завистовский, Т.И. Завистовская, А.С. Кириенко // Практика и перспективы развития институционального партнерства : материалы междунар. науч.-практ. семинара. – Таганрог, 2002. – 186 с.
8. Завистовский, С.Э. Разработка эффективного абразивного инструмента для лентошлифовальной обработки напыленных поверхностей / С.Э. Завистовский, А.С. Кириенко, Т.И. Завистовская // Сварка и родственные технологии : респ. межведомственный сб. науч. тр. ; ГУ НИКТИ СП с ОП ; редкол.: Г.Н. Здор [и др.]. – Минск, 2004. – Вып. 6. – С. 87–89.
9. Завистовский, С.Э. Лентошлифовальный инструмент для отделочной обработки восстановленных и упроченных шеек коленчатых валов / С.Э. Завистовский, А.С. Кириенко, Т.И. Завистовская // Вестник Полоцкого государственного университета. Сер. В, Прикладные науки. Промышленность. – 2005. – № 12. – С. 127–131.
10. Кириенко, А.С. Технология изготовления специального ленточного абразивного инструмента и оценка его производительности / А.С. Кириенко, С.Э. Завистовский // Вестник Полоцкого государственного университета. Сер. В, Прикладные науки. Промышленность. – 2006. – № 6. – С. 20–25.
11. Завистовский, С.Э. Особенности получения рабочей поверхности специального гибкого абразивного инструмента на предприятиях Витебской области / С.Э. Завистовский, А.С. Кириенко // Новые материалы и технологии: порошковая металлургия, композиционные материалы, защитные покрытия, сварка : сб. докл. 8-й междунар. науч.-техн. конф., Минск, 27–28 мая 2008 г. ; редкол.: А.Ф. Ильющенко [и др.]. – Минск, 2008. – С. 125–128.

12. Кириенко, А.С. Технология и оборудование для получения эластичного инструмента с ориентированными зернами абразива / А.С. Кириенко // Инновационные технологии в машиностроении : материалы междунар. науч.-техн. конф., посвящ. 35-летию машиностроительного фак. Полоц. гос. ун-та, Новополоцк, 19–20 октября 2011 г. ; М-во образования Респ. Беларусь ; Нац. акад. наук Беларуси ; Госкомитет по науке и технологиям ; Полоц. гос. ун-т ; под ред. А.И. Гордиенко, В.К. Шелега. – Новополоцк : ПГУ. – 2011. – С. 98–101.
13. Кириенко, А.С. Тенденции развития современных технологий производства эластичных инструментов с ориентированными зернами абразива / А.С. Кириенко // Инновационные технологии в машиностроении «ИННТЕХМАШ-2015», посвящ. 100-летию акад. П.И. Ящерицына и 40-летию машиностроительного фак. Полоц. гос. ун-та, Новополоцк, 28–29 октября 2015 г. ; Полоц. гос. ун-т ; под общ. ред. А.И. Гордиенко, В.К. Шелега. – Новополоцк : ПГУ, 2015. – С. 112–114.
14. Кириенко, А.С. Развитие шлифовального инструмента на эластичной основе / А.С. Кириенко, П.Н. Рогов // Инновационные технологии в машиностроении «ИННТЕХМАШ-2015», посвящ. 100-летию акад. П.И. Ящерицына и 40-летию машиностроительного фак. Полоц. гос. ун-та, Новополоцк, 28–29 октября 2015 г. ; Полоц. гос. ун-т ; под общ. ред. А.И. Гордиенко, В.К. Шелега. – Новополоцк : ПГУ, 2015. – С. 115–118.

Поступила 12.02.2018

#### THE BAND POLISHING TOOL WITH THE ORIENTED RELIEF THE ABRASIVE OF CONTAINING SUPERFICIAL LAYER

A. KIRIENKO

*For the developers of flexible polishing instruments most interest presents possibility of prognostication of operating descriptions of instrument on the stage of planning and achievement of necessary parameters at his making and subsequent exploitation. In the article the scientifically reasonable and experimentally confirmed methods of management are presented forming of the oriented structures and values of corners of orientation of grains of abrasive in the working surfaces of the flexible instruments used for polishing of different construction materials. There are results of analytical estimation of macroscopic researches, cutting process by the oriented grain and researches of wearproofness of the got standards of band polishing instrument with the corners of oriented 0, 10, 20, 40, 60° grains of electro-corundum of 14A of relatively tissue basis.*

**Keywords:** *abrasive materials, relief of superficial layer, oriented of grains of abrasive, electrostatic field, macroscopic researches, productivity of polishing tools.*

## ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

УДК 621.89

### ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ НА МАСЛА – ИННОВАЦИЯ В ТРИБОТЕХНИКЕ

**Н.К. ВЕРШИНИН, Д.Н. ЛЮБИМОВ**

*(Инжиниринговый Центр, Шахты, Россия);*

**А.В. ДУНАЕВ**

*(Федеральный научный агроинженерный Центр ВИМ, Москва, Россия);*

**И.Ф. ПУСТОВОЙ**

*(РеалИнПроект, Ленинградская обл., п. Кузьмолковский, Россия);*

**В.Г. РЫЖОВ**

*(ТРИГГЕР, Балашиха, Россия);*

**В.Э. ШАЛИМОВ**

*(НИИЦ АТ 3-й Центр НИИ МО РФ, Бронницы, Россия)*

*Представлен анализ результатов исследований, оригинальных лабораторных, эксплуатационных на десятках автомобилей испытаний. Подтверждается возможность малозатратного и заметного улучшения триботехнических свойств сопряжений, работающих в моторных и трансмиссионных маслах, путем электрического воздействия на них. В лабораторных испытаниях подачей напряжения постоянного тока 12...33 В, а возможно и до 100 В, на электроды из медных, алюминиевых, цинковых и оловянных сплавов, омываемые маслом, достигалось значительное уменьшение трения и изнашивания при малых нагрузках, меньшее – при средних, отсутствие эффекта – в номинальном режиме. В процессе эксплуатации машин подача напряжения постоянного тока даже на стальные электроды в маслах двигателей, агрегатов трансмиссии обеспечивает экономию не менее 3%, в легких условиях – 10...18%, а в основном – 12% топлива. Показана целесообразность апробации обработки гидромасел.*

**Ключевые слова:** *электричество, масло, коэффициент трения, изнашивание, комплексная обработка, трибосостав, двигатель, трансмиссия, расход топлива.*

**Введение.** Для уменьшения трения и изнашивания совершенствуют детали, узлы, агрегаты машин и их смазочные материалы, созданы новые базы масел и присадки, а при эксплуатации в масла вводятся разнообразие добавки [9; 10]. Современные масла и смазки обладают комплексом рабочих свойств высокого качества благодаря сложному технологическому их производству, но дорогостоящие. Возможности дальнейшего совершенствования масел и смазок ограничены и не оправданны, а физика и химия имеют арсенал мало использованных методов для улучшения триботехнических свойств масел [1–3; 5; 8–10]. Такими методами модификаций работающих масел могут быть электрическая, магнитная, электромагнитная обработки, изменяющие структуру и свойства углеводородов [2–4; 8]. Эти воздействия через деструкцию конгломератов молекул присадок и масел, образование активных радикалов, поляризацию компонентов масел, насыщение их зарядами и перенос зарядов на поверхности трения приводят к некоторому изменению процессов трения.

Физическая и химическая адсорбция на поверхностях трения, естественно, имеют электрическую природу, но влияние на них силовых полей деталей и внешних полей исследовано мало [1–3; 5; 6]. Взаимодействия между молекулами смазки, по имеющимся данным, также подвержены электрическим и магнитным воздействиям. Например, у электрообработанных углеводородов диспергируются кластеры, уменьшаются поверхностное натяжение жидкостей, вязкость, плотность, теплотворная способность топлив и др. [10].

В целом электрические процессы между поверхностями трения определяют их трибологию [5; 6]. Аналогичные процессы между компонентами смазок влияют на их вязкостно-температурные свойства, фазовое состояние, прочность смазочных слоев [1–3; 7]. Однако, несмотря на электрическую природу всех взаимодействий в трибосистеме, в трибологии им уделено недостаточно внимания [6].

Основной нормальный износ сопряжений происходит при граничном и смешанном трении. Здесь влияние электрических и магнитных полей намного больше, чем при жидкостной, гидродинамической смазке. Исследований, связанных с изучением этого влияния, немного [5; 6], однако выявлены некоторые закономерности трибоэлектризации, ряды веществ по способности к ней (Фарадея, Гезехауса). Ошибочно считается, что тела электризуются противоположными зарядами. Исследованиями Ф.М. Канарёва и Ю.С. Рыбникова убедительно доказано, что разных по знаку зарядов не существует.

В триботехнике подача напряжения 60 В постоянного тока на пару трения четырехшариковой машины у Ю.С. Заславского [5] снижала коэффициент трения на 40%. При напряжении +4 В на диске и токе 5 мА образовывалась коричневая оксидная пленка со снижением шероховатости, износ практически

отсутствовал, сохранялись следы обработки, но на шариках присутствовало абразивное изнашивание. Когда через 30 мин отключали электричество, то получали очень хорошую приработку диска с коэффициентом трения 0,02. Но при подаче на диск минус 4 В триботехника ухудшалась [5]: коэффициент трения возрастал, на диске без оксидных пленок наблюдался интенсивный износ, а износ шариков снижался.

В других трибоиспытаниях [5] в магнитном поле происходило намагничивание частиц износа, образовывался «защитный слой», отмечалось окислительное, а не абразивное изнашивание, так как сами частицы износа окислялись. Например, в МАДИ\* подавали постоянный ток на гильзы цилиндров дизеля ЯМЗ-236 автосамосвала МАЗ-500. Через год выявлено почти полное отсутствие износа и предотвращение нагара в цилиндропоршневой группе. Импульсы напряжения до 192 В и силы тока до 0,03 А при трении деталей и ударе плиты шариком выявлены А.Д. Дубининым [6]. Это свидетельствует о том, что электрические процессы в условиях трения более сложны, чем полагали. И если металлы имеют разные электрические потенциалы, в трибопаре возможна электрическая эрозия. При трении заряд удерживают на себе только диэлектрики и полупроводники – с проводников заряды быстро стекают, но их можно контролировать по напряжению и току. Отсюда, по Ю.С. Рыбникову, несмотря на отсутствие полного понимания трибоэлектрических явлений, связав их динамику с силой трения и интенсивностью изнашивания, можно точнее оптимизировать характеристики сопряжений.

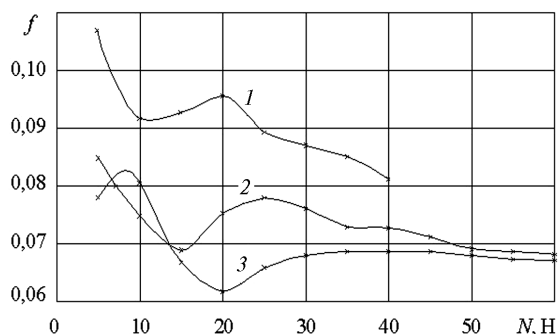
**Постановка задачи.** В работе поставлена задача выявить, используя трибометр TRB-S-DE, влияние на коэффициент трения, изнашивание трибопары электрического действия на масла, а в эксплуатационных испытаниях – на улучшение экономичности автомобилей, где используется воздействие электричества на моторные и трансмиссионные масла.

**Проведение лабораторных исследований и обсуждение их результатов.** Электрофизические и триботехнические исследования с электрообработкой масел впервые проведены в Украинской академии ж.-д. транспорта (УкрДАЗТ) – научной школой проф. Е.Н. Лыскова [2; 3]. Исследовано влияние на масла электростатического, магнитного и электромагнитного полей. Подтверждено, что они оказывают существенное влияние на молекулы присадок и полярных молекул масел [2; 3].

Исходная посылка в УкрДАЗТ – некоторые компоненты масел являются полярными, электрически заряженными, имеющими магнитный дипольный момент, что указывает на имеющийся механизм управления взаимодействием масел, смазок с шероховатостями поверхностей деталей с ненасыщенными валентностями, а следовательно и на механизм улучшения триботехники сопряжений. Но этот механизм требует изучения и оптимизации [1–3; 5; 6; 8].

Предположено [2], что обеспечивать эффективный слой смазки можно как усилением поля поверхностей трения подводом энергии извне, так и электростатическим, электромагнитным воздействием на масла. Подтверждением этому служат уникальные микроснимки проб масла в электрическом поле, графики зависимостей толщины слоя смазки, его несущей способности, интенсивностей трения и момента трения при воздействии на масла постоянного, высокой интенсивности электрического поля в различных условиях испытаний [2; 3]. Вместе с тем имеются и другие способы воздействия на масла.

Так, в Наноцентре ГОСНИТИ на трибометре TRB-S-DE с парой «палец – диск» проведены испытания 10 проб масел М-10Г<sub>2К</sub>, прокаченных (Б.И. Шором) через электронный катализатор топлив (И.В. Евграфова, ГНУ ВИЭСХ), т.е. подвергнутых воздействию электромагнитного поля (7,5...9,0 кВ, 7...8 кГц). На рисунке 1 проиллюстрирована часть этих испытаний. Близкие результаты получены и при испытании масел, обработанных подобным образом В.В. Сербиным (ГНУ ВИЭСХ).



1 – исходное масло; 2, 3 – масла, подвергнутые электромагнитным воздействиям разной интенсивности

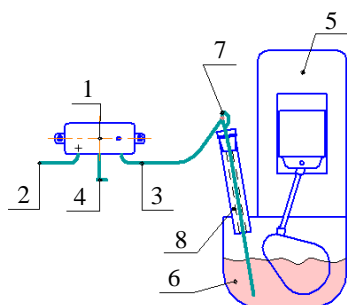
**Рисунок 1. – Снижение коэффициента трения пары «палец – диск» в масле М-10Г<sub>2К</sub> в зависимости от нагрузки при скорости скольжения 100 см/с; в исходном масле – 0,087, в масле после электромагнитного воздействия – 0,068**

\* МАДИ (1930–1992 гг.) – Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет.

Из рисунка 1 следует, что электромагнитные воздействия на масла, выполненные до трибоиспытаний в Наноцентре ГОСНИТИ, все же заметно снизили коэффициент трения.

Более просто реализовано электрическое воздействие на масла в инженеринговом Центре «ЛИК» [8]: через изолированные детали в масло подаются электрические заряды. Предполагается, что реализуется поляризация молекул масел, которая усиливает их адгезию к поверхностям трения, изменяет тип структурной ориентации, увеличивает толщину смазочной пленки и скорость плакирования поверхностей трения заряженными компонентами смазочной среды.

Разработанный в ИЦ «ЛИК» «поляризатор» [8] можно использовать для любых агрегатов, например, с изолированным масломерным щупом (рисунок 2), с «антенной» вместо сливной пробки, с другими



- 1 – поляризатор; 2 – вход электропитания;  
3 – выход на масломерный щуп;  
4 – выход на массу агрегата; 5 – агрегат;  
6 – масло агрегата; 7 – масломерный щуп;  
8 – изолирующая трубка (капролон, полихлорвинил)

Рисунок 2. – Схема подключения поляризатора на ДВС

детальными в картерах агрегатов, со вставками в маслофильтрах и т.п. Действие поляризатора постоянно, не зависит от масла, вида сопряжения, нагрузочно-скоростных режимов, он испытан на бензиновых ДВС, разных редукторах, судовых дизелях, в редукторах нефтекачалок.

Первые лабораторные испытания поляризатора проведены на машине трения «Тимкен» [8] с касторовым маслом по ГОСТ 18102 (полярная, поверхностно-активная среда с высоким йодным числом). При этом задиры в паре отсутствовали, т.е. граничная смазочная пленка на поверхности трения держалась прочно.

В Наноцентре ГОСНИТИ подача электрочарядов в масла исследована на стальной трибопаре «палец – диск» в моторном масле М-10Г<sub>2к</sub> по эффективности снижения коэффициента трения и износа пары. Здесь по стандартной для трибометра TRB-S-DE методике испытаний в режиме ступенчатого нагружения с постоянной скоростью скольжения пальца по диску 100 см/с, 6 форм напряжений подавали на разные электроды, вводимые в бурун масла за пальцем трибопары.

В начале с двух источников подавали низкочастотное униполярное напряжение 3 В и высокочастотное униполярное напряжение 32,9 В. Анализ результатов испытаний показал, что при низких частотах (5...30 кГц) и низких напряжениях коэффициент трения несколько снижается при средних и повышенных нагрузках, а при напряжении 32,9 В это снижение наибольшее – до 0,010.

В снижении изнашивания трибопары (рисунок 3) выявлено, что низкие частоты (до 10 кГц) и повышенное напряжение на электроды (в 1,5 раза) играют положительную роль.

Динамика высоты положения индентора при испытании макетов ЭРТ конструкторского отдела ГОСНИТИ с медным электродом

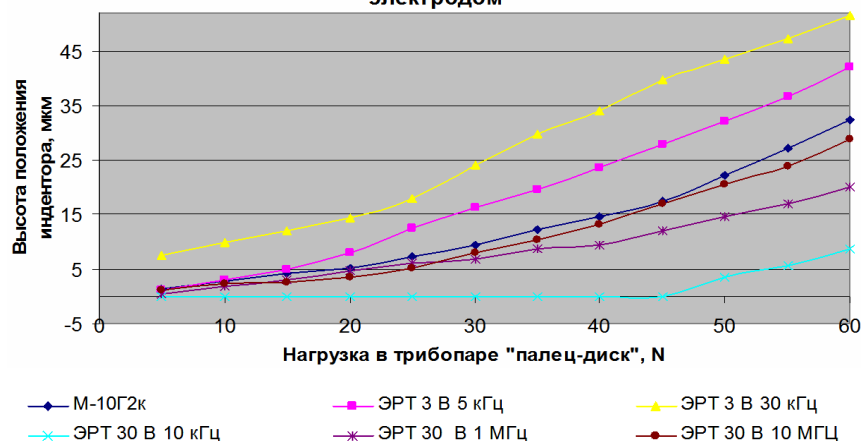


Рисунок 3. – Результаты испытаний макетных образцов источников напряжения при подаче в масла электричества через медный электрод

Трибоиспытания, проведенные с поляризатором ИЦ «ЛИК» при медном, алюминиевом, оловянном, цинковом, стальном и угольном электродах (рисунок 4), показали повышенную эффективность самого поляризатора при малых и средних нагрузках (снижение коэффициента трения на 0,0193...0,0589, до 0,036).

Контроль масла М-10Г<sub>2К</sub> при действии поляризатора показал, что между (1 см) электродами прибора Ц4324, введенными в поле действия поляризатора, возникало напряжение 2,8...3,1 мВ.

В целом в испытаниях Наноцентра ГОСНИТИ коэффициент трения снижался с 0,08...0,09 до 0,036, а износ – в 3,5 раза.

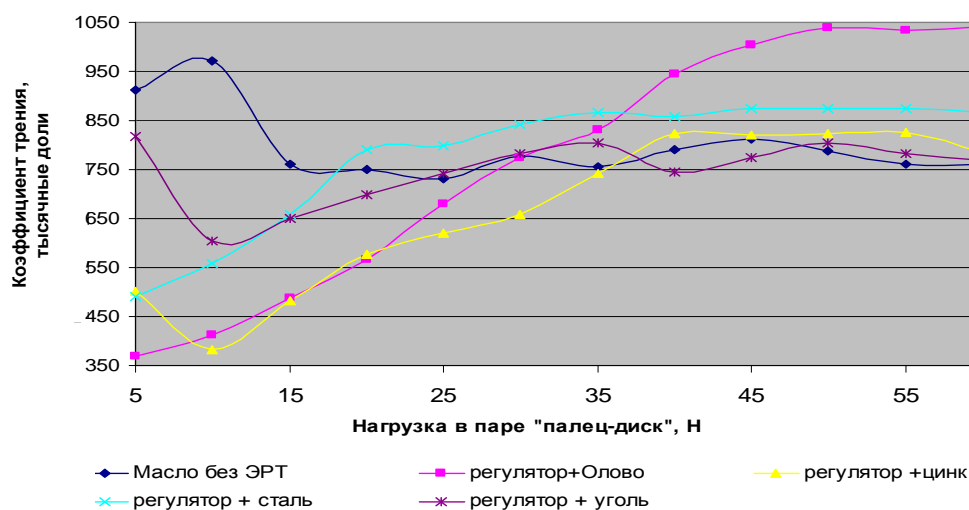


Рисунок 4. – Результаты испытаний поляризатора (с цинковым электродом при нагрузке 10 Н коэффициент трения снизился на 0,0589)

**Стендовые испытания поляризатора и обсуждение их результатов.** В Финляндии в сертифицированной лаборатории с автомобилем AUDI A4 на барабанном диагностическом стенде проведены длительные испытания поляризатора в стационарных нагрузочно-скоростных режимах: число оборотов коленвала дизеля  $1500 \text{ мин}^{-1}$  (85 км/ч) и  $2500 \text{ мин}^{-1}$  (142,09 км/ч), масло класса вязкости 15W-40 [8]. Выявлено, что на скорости 85 км/ч экономия топлива составила 22,4%, а в форсированном режиме 142 км/ч – лишь 3,7%.

Проведены также стендовые моторные испытания дизеля в форсированном режиме (частота вращения 2000 об/мин, крутящий момент 95 Н·м). При этом экономия топлива с поляризатором составила как минимум 3,2%.

Таким образом [8], эти испытания показали экономию дизельного топлива более 3%.

Аналогичная эффективность зафиксирована в стендовых испытаниях ДВС ВАЗ-2108, проведенных А.Ю. Шабановым [9] (Политехнический университет, СПбПУ). По результатам контроля 276 параметров работы ДВС показано, что механические потери в ДВС уменьшились на 5,5%, расход топлива – на 4,3%, температура отработавших газов на 6...10 °С, содержание СО и СН на 19%, но содержание  $\text{NO}_x$  увеличилось на 6,53%. Эффективный КПД двигателя повысился на 4,62%, мощность – на 1%. Иными словами, схожая экономия топлива выявлена как на бензиновом, так и на дизельном ДВС [8; 9].

Физико-химического действия электрообработанных масел на поверхности трения, по-видимому, нет, триботехника улучшается опосредованно. Наибольшая ее эффективность проявляется не сразу, а только с интенсивным поступлением заряженных порций масла в сопряжения. С отключением поляризатора показатели ДВС быстро возвращаются к исходному уровню. Показано [8], что без нарушений требований техники безопасности целесообразно подавать на электроды в масле постоянное напряжение до 100 В, а большие уровни эффект не повышают. Требуемые частоты и форма импульсов напряжения к электродам не ясны.

По данным ИЦ «ЛИК» [8], снижение расхода бензина, дизельного и газового топлива с поляризатором достигает 10...12%. К 2018 году в России более 100 отечественных и импортных автомобилей работают с поляризатором. Их владельцы отмечали повышение «приемистости» автомобиля [8], очистку масла от продуктов окисления, а цилиндропоршневой группы ДВС – от нагара.

Поляризатор, как и прием МАДИ подачи напряжения на гильзы цилиндров дизеля ЯМЗ-236 (журнал Автомобильный транспорт, 1985), осветляя масло, способствует заметному повышению ресурса ДВС.

В исследованиях ASTM принято, что если масло обеспечивает 1,5% (Energy Conserving I) или 2,3% (Energy Conserving II) топливную экономичность, оно считается энергосберегающим [8]. Вследствие этого поляризатор может быть отнесен к энергосберегающим средствам.

**Эксплуатационные испытания поляризатора от ИЦ «ЛИК» в ГОСНИТИ.** Испытания проведены А.И. Железницким на автомобиле ВАЗ-2131М (инжекторный двигатель ВАЗ-21214, пробег 55372 км),



дважды полностью обработанным геомодификатором. Непрерывный расход топлива контролировали прибором «Prestige y55» электронного блока управления двигателем. Паспортный расход топлива – 12,0 л/100 км бензина А-95, фактический – 9,5 л/100 км бензина А-92.

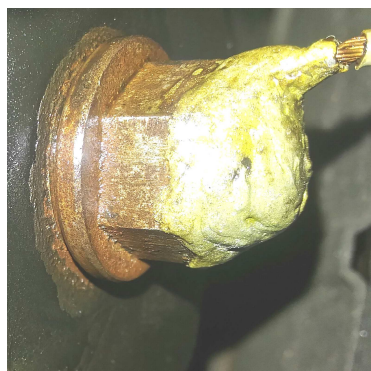
Усредненные по 5-ти измерениям расходы топлива при испытании таковы:

- до подачи электричества на щуп в масле ДВС 7,2...6,5 л/ч, в среднем 6,75 л/ч;
- при подаче электричества в среднем – 5,96 л/ч, уменьшение на 0,79 л/ч;
- после отключения подачи электричества в среднем – 6,14 л/ч.

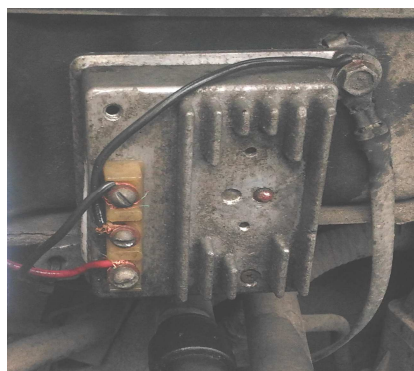
Минимальная разность расходов без подачи электричества и с подачей – 0,18 л/ч, или 3%, а в сравнении с ездой по городу около 9%.

Обширные испытания электрообработки моторных, трансмиссионных масел с вводом в них серпентинового модификатора поверхности трения «Fe-do» проведены И.Ф. Пустовым. На основании лабораторных, стендовых и натурных испытаний с 90-х годов [9] им обосновано главное включение поляризатора только после трибообработки агрегатов составом «Fe-Do». До него ввод трибосостава на очистку ДВС удаляет отложения с поверхностей трения, открывает их ювенильность, что в дальнейшем обеспечивает более эффективное действие поляризатора.

Напряжение на электрод в масле ДВС подается через 1...2 тыс. км пробега после основной трибообработки. Апробирована подача напряжения на изолированную «антенну» вместо сливной пробки масляного поддона ДВС (рисунок 5).



а



б

**Рисунок 5. – «Антенна» из набора медных проволок в корпусе сливной пробки масляного поддона ДВС (а); стандартный источник постоянного напряжения +48 В на передней панели моторного отсека автомобиля (б)**

После очистительной и основной трибообработки с последующей подачей напряжения +48 В испытали 25 автомобилей на трассе «Санкт-Петербург – Петрозаводск». Здесь снижение расхода топлива по показаниям контроллеров автомобилей составило 5...6%, а с подачей напряжения на «антенны» – еще на 2...3%. Суммарная экономия повышалась до 7...9%. Но если поляризатор включать в процессе основной трибообработки, эффект от его применения незначительный.

После трибообработки агрегатов трансмиссий, также составом «Fe-do», апробирована и подача напряжения в их масла через изолированные стержни вместо сливных пробок. Здесь расход топлива снижен еще на 1,5...2 %, а в целом по автомобилю на 8,5...11%. Так, на автомобиле Ford F-150 (бензиновый двигатель V-8, пробег 250 тыс. км) расход топлива на той же трассе составил 15 л/100 км, а после комплексной трибообработки ДВС с подачей напряжения на «антенну» расход составил 13,7 л/100 км. Подача же напряжения на стержни в масле двух трибообработанных ведущих мостов и раздаточной коробки снизило расход топлива до 13,2 л/100 км. Далее расход уменьшался до 10...11 л/100 км.

Пример более детальной комплексной обработки ДВС:

- подключают поляризатор, в масло вводят очищающий состав «Fe-do», что при пробеге 200...300 км дает более эффективную очистку от отложений и разрушенных частей кристаллов в основных сопряжениях ДВС;

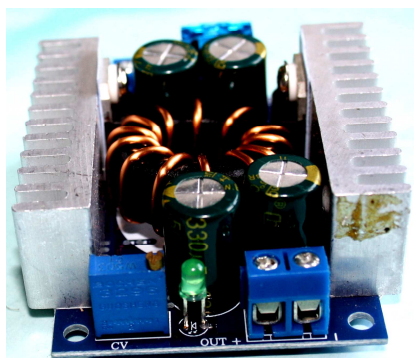
- после заданного пробега сливают очищающее масло, заливают свежее с тем же составом «Fe-do»;

- через 1...2 тыс. км пробега от основной трибообработки в очищенный ДВС с открытыми в нем ювенильными поверхностями трения подают напряжение (возможно и +100 В) на «антенну».

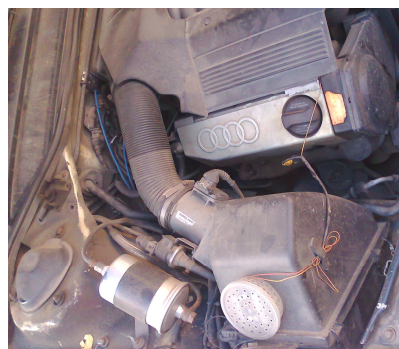
На основании эксплуатационных испытаний многих ДВС установлено, что такая последовательность комплекса обработок с воздействием поляризатора на уже образованные трибосоставом «Fe-do» антифрикционные покрытия обеспечивает более эффективный тюнинг агрегатов и машин в целом, но требуется его проверка. Испытания электровоздействия на масла с использованием промышленных преобразо-



вателей (рисунок 6) выполнены В.Г. Рыжовым на двух автомобилях. Первый – марки АУДИ 100, ДВС V-6, 2,8 л, инжекторная подача топлива, механическая коробка передач. Второй – марки АУДИ А4, ДВС – дизель 2,4 л с турбонаддувом, механическая коробка передач.



а



б

**Рисунок 6. – Преобразователь марки 14-59И ПМ (а)  
для регулируемой подачи постоянного напряжения от +12 В до +50 В;  
б – монтаж преобразователя в пластмассовом перфорированном барабане на корпусе воздухофильтра,  
отвод проводов на головку блока цилиндров и к масломерному щупу**

На первом автомобиле ДВС отремонтирован и после обработки уникальным серпентиновым трибосоставом «РВД» обкатан в пробеге 8 тыс. км. Устоявшийся расход топлива в смешанном режиме движения составлял 10,6 л/100 км.

С промышленным преобразователем +12В/+48 В, отрегулированным на максимальное выходное напряжение 47,2 В, к середине февраля 2018 года автомобилем пройдено 23660 км. Контроль автомобиля велся в смешанных режимах движения, а расхода топлива – по показаниям бортового компьютера.

С первым маслом класса вязкости 5W-40 в первые 2 часа поездок изменений не зафиксировано, но затем отмечена «мягкость» работы ДВС. Первые длительные наблюдения в пробеге Москва – Екатеринбург протяженностью 2250 км. Здесь экономия топлива составила 8...12%. В обратной поездке с прицепом (груз 400...450 кг) экономия топлива повысилась до 16...18%, т.е. расход топлива, как и в движении без прицепа. Однако появился сизый дым отработавших газов. Диагностирование выявило неожиданное закоксовывание поршневых колец средней степени, что было устранено дополнительным вводом трибосостава «РВД». Температура охлаждающей жидкости ДВС составила 98...100 °С, преобразователь с пробега 7000 км отключили из-за увеличения расхода масла (около 1 л на 1000 км), что ранее не наблюдалось.

Для нормализации теплового режима ДВС установили радиатор с большей эффективностью, заменили датчик включения вентиляторов на температуру 90...92 °С. После этого дымление и закоксовывание колец прекратились, преобразователь включили снова, экономия топлива составила 8...10%.

Далее использовали масло класса вязкости 10W-40. В первые 2500 км пробега снижение расхода топлива не выявлено, но затем отмечалась экономия около 12%. Закоксовывание колец не выявлено. Замечено, что на прогревом ДВС экономия топлива больше, чем в коротких поездках на холодном ДВС. Изменение тяговитости двигателя не зафиксировано, так как работала бортовая система дозированием топлива.

Усредненный расход топлива по компьютеру составлял 9,6 л/100 км, это минимум по программе управления двигателем, но фактический в смешанном режиме составлял 8,5...8,6 л/100 км, а без подключения преобразователя – 9,6...9,8 л/100 км. Замечено, что преобразователь более эффективен с проработавшими маслами, чем со свежими, и более жидкими. При вязкости масла 5W-40 экономия топлива заметно больше, чем с маслом вязкости 10W-40. Если зимой автомобиль прогрет полностью, то в среднем экономия топлива составляет 7,5...8%. Но так как полный прогрев затруднителен, и если ДВС недогрет, экономия топлива невозможна.

При частоте вращения коленчатого вала до 3000...3200 мин<sup>-1</sup> экономия топлива фиксируется явно, а при частоте свыше 3200 мин<sup>-1</sup> (скорость движения более 120 км/ч) экономия не выявляется. Вероятно, с повышением скорости скольжения в трении удельная подача электрозарядов масел в трибосопряжения уменьшается, и эффективность электрообработки падает. Отсюда можно предположить необходимость максимально возможной по объему и по скорости подачи электрозарядов в сопряжения трения.

Для надежной изоляции масломерного щупа и предотвращения выхода из-под него паров масла был изготовлен специальный электрод, но контроль им уровня масла не совсем удобен.

На дизельном автомобиле с подключенным преобразователем (февраль 2018 г.) пройдено 21200 км, использовалось масло класса вязкости 5W-40. Расход топлива фиксировался в городских и трассовых усло-

виях. После обработки ДВС трибосоставом «РВД» устоявшийся средний расход составлял 4,2...4,3 л/100 км. После включения преобразователя расход снизился до 3,9...3,8 л/100 км как по показаниям бортового компьютера, так и фактически, т.е. уменьшился на 11,05%.

**Заключение.** Электрическое воздействие на масла – малозатратный ресурсосберегающий способ, но необходима оптимизация уровня и формы напряжения, конструкции источника тока, электродов из цинковых, магниевых сплавов для картеров агрегатов, масляных магистралей ДВС, маслофильтров.

Полагаем, что требуется обеспечивать максимум количества и скорости подачи заряженных молекул масел в трибосопряжения, для этого целесообразно устанавливать электроды в бурун масел, в поток масла к главной масляной магистрали, в ней самой.

Коагуляция смол в масле, повышенное первоначальное дымление ДВС с поляризатором требуют объяснения. Целесообразно испытать подачу электрорядов и в гидромасла.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ашуров, А.В. Применение внешних силовых полей для улучшения качества смазочных материалов / А.В. Ашуров, З.И. Сюняев, В.Э. Иванковский // Химия и технология топлив и масел. – М. : Химия, 1988. – С. 34–41.
2. Повышение ресурса технических систем путем использования электрических и магнитных полей / Е.Е. Александров [и др.]. – Харьков : НТУ «ХПИ», 2006. – 544 с.
3. Воронин, С.В. Влияние электрического и магнитного поля на механизм действия присадок к маслам / С.В. Воронин, А.В. Дунаев // Трение и износ. – 2015. – Т. 36, № 1. – С. 643–649.
4. Фильтр «Экомаг-200Г» магнитной очистки и обработки моторного масла двигателя внутреннего сгорания автомобиля : пат. RU 2373405 / Ю.И. Голиков, Д.В. Белоконев. – Оpubл. 20.11.2009.
5. Заславский, Ю.С. Новое в трибологии смазочных материалов / Ю.С. Заславский, В.П. Артемьева. – М. : Изд-во «Нефть и газ» РГУНГ им. И.М. Губкина, 2001. – 480 с.
6. Дубинин, А.Д. Энергетика трения и износа деталей / А.Д. Дубинин. – Киев : Машгиз (юж. отд-ние), 1963. – 140 с.
7. Ахматов, А.С. Молекулярная физика граничного трения / А.С. Ахматов. – М. : Физматгиз, 1963. – 472 с.
8. Антифрикционная эффективность поляризации масел – инновационный фактор модернизации машин / Д.Н. Любимов. – М. : Труды ГОСНИТИ, 2014. – Т. 116. – С. 40–44.
9. Эксплуатационные эффекты применения минералов как активных агентов смазочных сред / Д.Н. Любимов [и др.] // Тракторы и сельхозмашины. – 2015. – № 3. – С. 38–44.
10. Нетрадиционная триботехника. Некоторые итоги развития в России / А.В. Дунаев [и др.]. – Saarbrücken : Lambert Academia Publishing, 2017. – 217 с.

Поступила 16.02.2018

#### ELECTRIC IMPACT ON OIL – INNOVATION IN TRIBOLOGICAL ENGINEERING

**N. VERSHININ, D. LYUBIMOV, A. DUNAEV,  
I. PUSTOVOI, V. RYZHOV, V. SHALIMOV**

*The analysis of the results of known studies, the original laboratory and operational on dozens of cars, confirmed the possibility of low-cost and marked improvement of the tribological properties of the mate working in the engine and trans fees and commissions in oils by electric impact on them. In laboratory tests, the hearth-whose DC voltage 12...33, and possibly to 100, on parts made of copper, aluminum, zinc and tin alloy washed by oil, achieved a significant decrease of friction and wear at low loads, less so at medium and no effect in the nominal mode. In conditions of operation, the modernization of machines by the supply voltage in continuing current by the oil isolated even steel parts in the engine and in the transmission units savings of at least 3. In different conditions – 10...18%, and basically 12% motor fuel. Appropriate the same treatment of oil hydraulic equipment.*

**Keywords:** *electricity, oil, friction, wear, complex processing, tribologists, the internal combustion engine, the transmission assembly, the fuel consumption.*

УДК 665.637.7

## ПОЛУЧЕНИЕ ЗАЩИТНОГО ВОСКА ДЛЯ РЕЗИН ИЗ ПОБОЧНЫХ ПРОДУКТОВ ПРОЦЕССА ДЕПАРАФИНИЗАЦИИ МАСЕЛ

канд. техн. наук А.В. МИТИНОВ; канд. техн. наук, доц. Е.В. САФРОНОВА  
(Полоцкий государственный университет)

*Представлены результаты работы по определению возможности получения на отечественных сырьевых ресурсах импортозамещающего аналога защитного воска для резин. Показана целесообразность применения в качестве ингредиентов защитного воска для резин очищенных побочных продуктов процесса депарафинизации минеральных масел. Предложен эффективный метод контроля состава парафиновых компаундов с использованием прибора дифференциального термического анализа.*

**Ключевые слова:** защитный воск, озоновое старение, резины, парафин, церезин, компаунд.

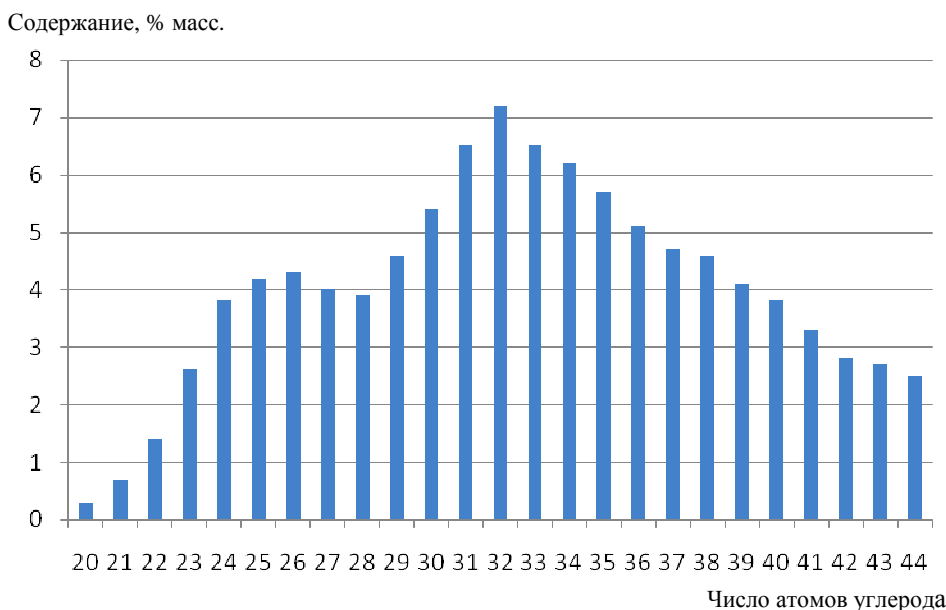
**Введение.** В многокомпонентных резиновых смесях, применяемых для изготовления автомобильных шин, защитные воски являются ингредиентами, ответственными за предотвращение озонового старения. Механизм действия защитных восков обычно объясняют миграцией на поверхность резины углеводородов парафинового ряда с образованием непроницаемой для озона защитной пленки [1; 2]. Эффективность защитного действия восков определяется толщиной пленки и совокупностью его физико-химических характеристик [2; 3]. Одной из важнейших характеристик, определяющих температурный диапазон защитного действия восков, является температура плавления входящих в состав воска парафинов. С повышением температуры эксплуатации резин требуется применять защитные воски с более высокотемпературными компонентами [2; 3]. Сложившаяся практика создания защитных восков для работы в составе резин, применяемых в реальных условиях достаточно широкого диапазона температур эксплуатации автомобильных шин, предопределила оптимальный вариант состава защитных парафиновых восков фракционного состава от 20 до 50 атомов углерода. Целый ряд выпускаемых российскими предприятиями защитных восков для резин по составу представляет собой смесь относительно низкоплавких парафинов нормального строения и высокоплавких микрокристаллических восков. Среди таких продуктов можно назвать следующие: защитный воск парафиновый нефтяной ЯВ-1 по ТУ 38.301-25-11-93; защитный воск ЗВ-П по ТУ 398.1011290-90; защитный воск Паралайт-17 по ТУ 38.1011042-85; другие. Аналогичная ситуация по созданию углеводородных композиций для применения в качестве защитных восков наблюдается и за рубежом.

Учитывая наличие в Республике Беларусь собственного производства минеральных масел, сопровождающегося получением побочных парафинсодержащих продуктов, представляется перспективной организация производства эффективного импортозамещающего защитного воска для отечественной шинной промышленности.

**Основная часть.** Для изучения возможности изготовления эффективного импортозамещающего защитного воска в качестве аналога выбран применяемый ОАО «Белшина» защитный воск Окерин 2122 производства фирмы «Paramelt» (Нидерланды). Производителем продукт описывается как антиозоновая восковая добавка из смеси очищенных углеводородов широкого углеводородного спектра, обеспечивающая защиту в широком диапазоне температур для использования в высоконагруженных шинах. Показатели качества предоставленного ОАО «Белшина» образца защитного воска по данным сертификата производителя приведены в таблице 1, а данные хроматографического исследования углеводородного состава – на рисунке 1.

Таблица 1. – Свойства защитного воска Окерин 2122

Наименование показателей	Единицы измерения	Норма по спецификации	Установлено анализом	Метод анализа
1. Цвет		светло-желтый	светло-желтый	
2. Температура плавления	°С	63...67	65,0	ASTM D 938
3. Содержание масла	%	0...1	0,8	ASTM D 721
4. Вязкость кинематическая при 100 °С	мм <sup>2</sup> /с	6,5...7,2	6,89	ASTM D 445
5. Показатель преломления		1,4255...1,432	1,4269	ASTM D 1747
6. Зольность		0...0,1	0,01	



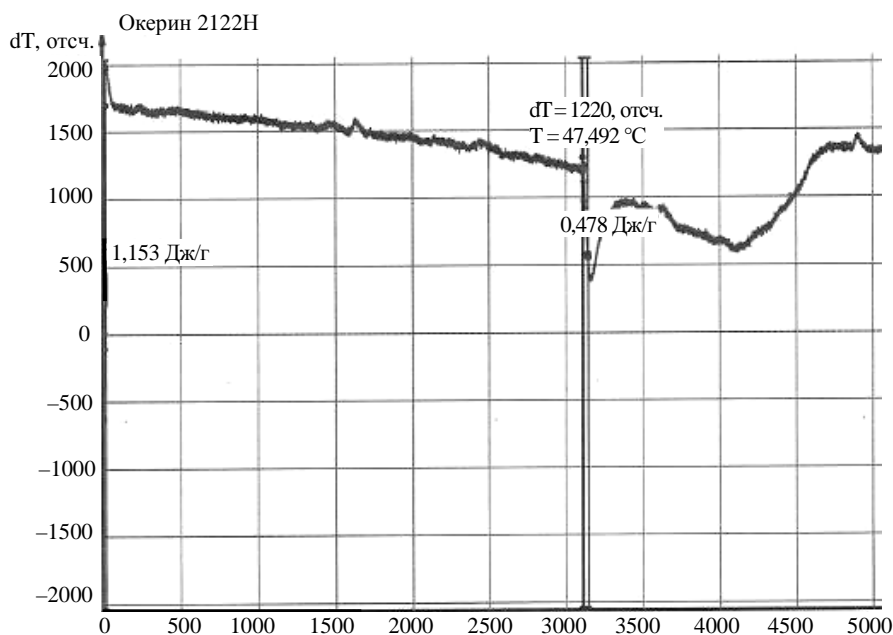
**Рисунок 1. – Распределение углеводородов парафинового ряда защитного воска Окерин 2122**

Как видно из рисунка 1, в состав защитного воска Окерин 2122 входят достаточно узкая парафиновая фракция с пиком  $C_{26}$  и более широкая фракция с пиком  $C_{32}$  со значительным содержанием высокомолекулярных изопарафинов.

Для получения более полной информации о составе защитного воска в качестве дополнительного метода исследования применен дифференциально-термический анализ.

В случае анализа смесей парафинов, являющихся кристаллическими веществами с четким термическим эффектом при фазовом переходе, в качестве способа идентификации ингредиентов целесообразным является метод дифференциально-термического анализа [4].

Результаты исследования образца защитного воска Окерин 2122 массой 30 мг, выполненного на приборе дифференциально-термического анализа высокого разрешения ДСК 500 при скорости нагрева  $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{мин}$ , показаны на рисунке 2.



**Рисунок 2. – Кривая дифференциального термического анализа защитного воска Окерин 2122**

Приведенные в таблице 1 высокие значения вязкости и температуры плавления косвенно подтверждают преобладание в компаунде церезиновой фракции. Данные дифференциально-термического анализа (рисунок 2) также указывают на наличие двух фракций с различными пиками температур плавления. На рисунке 2 явно видно, что площади пиков фазового перехода компонентов с низкой и высокой температурами плавления заметно различаются. Учитывая, что по площади пика можно вычислить количество затраченной на фазовый переход теплоты и, следовательно, фракционный состав смеси, метод дифференциального анализа наравне с методом жидкостной хроматографии может быть использован для проектирования компаундов из известных ингредиентов. Преимущество метода дифференциально-термического анализа перед методом жидкостной хроматографии в случае кристаллизующихся веществ в скорости и простоте выполнения анализа.

Для определения возможности получения аналога исследуемого импортного защитного воска на основе отечественной сырьевой базы исследовали предоставленные ОАО «Нафтан» побочные продукты процесса депарафинизации вакуумных дистиллятов разных погонов. Анализ предоставленных ОАО «Завод горного воска» хроматограмм гачей различных фракций позволил определить границы и пиковые значения углеродных чисел каждой фракции. Результаты хроматографического анализа гачей ОАО «Нафтан» разных фракций представлены в таблице 2.

Таблица 2. – Фракционный состав побочных продуктов депарафинизации вакуумных дистиллятов

Наименование фракции	Границы фракции	Пиковое значение фракции
Гач из погона ВД1	$C_{20} \dots C_{30}$	$C_{26}$
Гач из погона ВД2	$C_{25} \dots C_{35}$	$C_{30}$
Гач из погона ВД3	$C_{29} \dots C_{40}$	$C_{34}$
Гач из погона ВД4	$C_{34} \dots C_{44}$	$C_{38}$

Как видно из таблицы 2, наиболее близки по фракционному составу к исследуемому импортному образцу воска Окерин 2122 (см. таблицу 1) фракция гача, полученная из погона ВД1, и фракция гача, полученная из погона ВД3. Следует отметить, что содержание парафинов  $C_{35}$  и выше в исследованной фракции из погона ВД4 значительно ниже, чем в защитном воске Окерин 2122, что указывает на применение в составе импортного защитного воска более высокомолекулярных церезинов.

Учитывая полученную информацию о составе импортного защитного воска и фракционном составе отечественных гачей, изготовлены компаунды, по фракционному составу примерно соответствующие составу воска Окерин 2122. На рисунке 3 приведена расчетная хроматограмма парафинового компаунда под названием «защитный воск ПГУ-14».

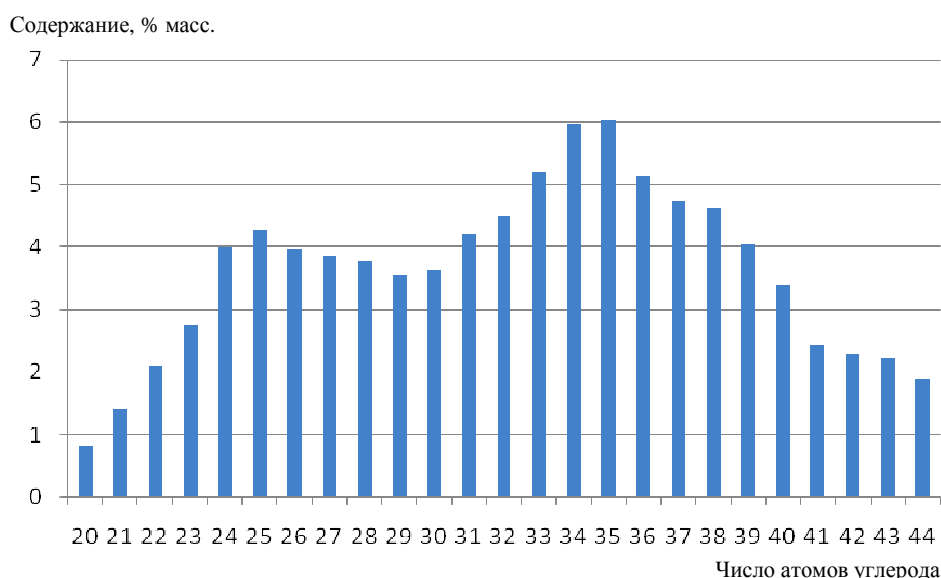
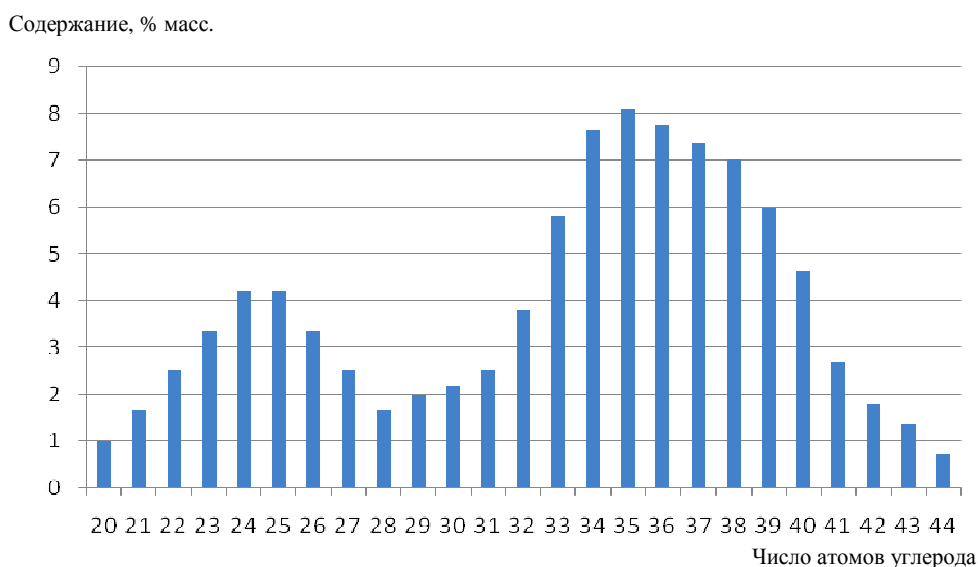


Рисунок 3. – Распределение углеводородов парафинового ряда защитного воска ПГУ-14

При составлении рецептуры защитного воска ПГУ-14 основной задачей было получение состава, максимально соответствующего аналогу. Для снижения содержания масла в полученном смесевом воске гачи из погонов ВД1, ВД2 и ВД3 были подвергнуты обезмасливанию методом потения на лабораторной установке до остаточного содержания масла около 2%. Для обеспечения соответствия фракционного со-

става композиции аналогу в части высокомолекулярных парафинов использовался петролатум с содержанием масла 8%. Последнее обстоятельство определило уровень содержания масла в компаундах – около 5%, что заметно превышает содержание масла в импортном аналоге. Следует отметить, что само по себе наличие масла в защитном воске не является показателем низкого качества. Технологии производства большей части отечественных защитных восков, предусматривающие использование гачей или петролатума, предопределяют высокий уровень содержания масла в продукте. При этом следует принимать во внимание, что минеральные масла, так же как и защитные воски, являются ингредиентами резиновых смесей, а повышенное содержание масла в воске может быть учтено корректировкой количества вовлекаемого масла.

Учитывая особенности производства и ранее имевшийся опыт получения парафиновых компаундов для иных целей, представлялось интересным определить возможность применения разработанной в Государственном предприятии «Институт нефти и химии» нефтяной церезиновой композиции по ТУ ВУ 190819222.005-2009 в качестве защитного воска для резин. Указанная композиция в своем составе, как и защитные воски, имеет парафиновый и церезиновый компоненты. В качестве высокоплавкого компонента при производстве церезиновой композиции использовался гач из погона ВД4, по своему составу и свойствам аналогичный неочищенному нефтяному церезину 65Н. Для моделирования состава композиции в качестве второго компонента применили парафин технический марки Т2, полученный очисткой методом потения гача из погона ВД1. Расчетный углеродный состав композиции церезиновой нефтяной приведен на рисунке 4.



**Рисунок 4. – Распределение углеводородов парафинового ряда композиции церезиновой нефтяной по ТУ ВУ 190819222.005-2009**

Изготовленные образцы защитного воска описанных составов прошли весенне-летние атмосферные испытания в ОАО «Белшина». По итогам испытаний в течение двух сезонов установлено, что наилучший (ожидаемый) результат, сопоставимый с результатом от применения защитного воска Окерин 2122, получен при использовании в составе резиновой смеси опытного защитного воска ПГУ-14. Это можно объяснить близостью составов опытного компаунда (см. рисунок 3) и импортного аналога (см. рисунок 1).

Наиболее вероятной причиной худших показателей при испытаниях на стойкость к озоновому растрескиванию резиновой смеси с введением в качестве защитного воска композиции церезиновой нефтяной ТУ ВУ 190819222.005-2009 является отсутствие в составе микрокристаллических восков выше С44 (рисунок 4). Такой результат еще раз подтвердил оправданность зарубежного и отечественного опыта по применению в составе защитных восков высокоплавких церезинов.

Кроме решения проблемы обеспечения необходимого уровня показателей качества проектируемого защитного воска, немаловажной задачей является обеспечение экономической конкурентоспособности. Технологический процесс депарафинизации масел в ОАО «Нафтан» позволяет получить качественный смесевой продукт парафиновой группы с малыми затратами. Организация производства защитного воска непосредственно на нефтеперерабатывающем предприятии обеспечит конкурентное преимущество, обусловленное двумя факторами. Первый из них это то, что применяемый в ОАО «Нафтан» метод депарафинизации масел селективными растворителями позволяет получать парафины и церезины приемлемой

чистоты. Кроме этого, наличие двух технологических установок депарафинизации позволяет при одновременной работе на разных погонах получать компаунд требуемого фракционного состава. Проблема получения защитного воска для резин в удобной для потребителя форме также может быть решена использованием существующей на заводе «Полимир» ОАО «Нафтан» распылительной грануляционной установки полиэтиленового воска.

**Заключение.** Разработка технологий получения на отечественной сырьевой базе новых продуктов с повышенной добавленной стоимостью является ресурсом роста экономики Республики Беларусь. В нефтеперерабатывающей промышленности перспективным направлением для использования являются побочные продукты этого же производства.

Технологический аудит действующих производств совместно с современным методологическим и аналитическим инструментарием может быть эффективен при разработке новых продуктов и технологий их производства. Представленный алгоритм выполненной работы по разработке состава и технологии получения импортозамещающего аналога защитного воска для отечественной шинной промышленности может быть применен и для выполнения аналогичных работ по вовлечению в эффективный хозяйственный оборот имеющихся сырьевых ресурсов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Защита от коррозии старения и биоповреждений машин, оборудования и сооружений. Справочник : в 2-х т. ; под ред. А.А. Герасименко. – М. : Машиностроение, 1987. – Т. 2 : Защита от коррозии старения и биоповреждений машин оборудования и сооружений.
2. Зуев, Ю.С. Стойкость эластомеров в эксплуатационных условиях / Ю.С. Зуев, Т.Г. Дегтева. – М. : Химия, 1986.
3. Казакова, Л.П. Твердые углеводороды нефти / Л.П. Казакова. – М. : Химия, 1987.
4. Мощенский, Ю.В. Дифференциальный термический анализ высокого разрешения в физикохимии гетерогенных конденсированных систем : автореф. дис. ... д-ра хим. наук : 02.00.04 / Ю.В. Мощенский. – Саратов, 2008.

Поступила 16.02.2018

#### PROCESSING OF MAKING PROTECTIVE WAX FOR RUBBER FROM BY-PRODUCTS OF THE DEPARAPHINIZATION PROCESSES OF OILS

A. MITINOV, E. SAFRONOVA

*The article presents the results of work on determining the possibility of making an import-substituting analog of protective wax for rubbers on domestic raw materials. The expediency of using as protective wax's ingredients for rubbers of purified by-products of the process of deparaphinization of mineral oils is shown. An effective method for controlling the composition of paraffin compounds with the use of a differential thermal analysis instrument is proposed.*

**Keywords:** protective wax, ozone aging, rubber, paraffin, ceresin, compound.

УДК 634.086.3:547.722.1

**КИНЕТИКА ДЕЛИГНИФИКАЦИИ ДРЕВЕСИНЫ ЕЛИ  
В УСЛОВИЯХ ИНАКТИВАЦИИ ЛИГНИНА**

*д-р хим. наук М.А. ЗИЛЬБЕРГЛЕЙТ*  
(Институт общей и неорганической химии НАН Беларуси, Минск);  
*канд. хим. наук, доц. С.Ф. ЯКУБОВСКИЙ*  
(Полоцкий государственный университет)

*Рассматриваются особенности кинетики реакции инактивации на примере делигнификации древесины ели водными растворами уксусной кислоты. Под инактивацией следует понимать изменение природы реагирующего вещества в ходе реакции, которая приводит к падению его реакционной способности. Приведены примеры протекания реакции делигнификации в водных растворах уксусной кислоты, которые сопровождаются автозамедлением. Для описания кинетики реакции предлагается использовать кинетические уравнения, в которых константа скорости реакции является монотонной функцией времени. В качестве метода поиска параметров использовано последовательное квадратичное программирование. Показано, что предложенное кинетическое описание процесса позволяет повысить степень соответствия опытных и расчетных данных, что значительно улучшает традиционный подход, который рассматривает кинетику реакции делигнификации как реакцию первого порядка.*

**Ключевые слова:** кинетика реакции, инактивация лигнина, водные растворы уксусной кислоты.

**Введение.** Явление инактивации или торможения реакции (автозамедление), как принято называть в некоторых исследованиях в химии природных и синтетических полимеров, не имеет широкого распространения. Однако инактивация встречается в таких достаточно важных для промышленности процессах, как получение целлюлозы, гидролиз полиакриламида, щелочной гидролиз полиметилакрилата, хлорирование полиэтилена и гидролиз полисахаридов [1].

Так, известно, что реакция гидролиза полиакриламида резко замедляется при накоплении в нем карбоксильных групп [2]. При глубоких конверсиях наблюдается блокирование амидных групп двумя ионизированными карбоксильными группами. Для описания такого процесса авторы некоторых работ применяют различные приемы для того, чтобы более или менее корректно изложить кинетику процесса. Наиболее известным из приемов описания кинетики в условиях инактивации (автозамедления) является использование дополнительной аппроксимирующей функции, которую вводят в кинетические уравнения, чтобы получить удовлетворительные результаты [2].

Накопление карбоксильных или сложноэфирных групп в полисахаридах также влияет на реакционную способность гликозидной связи к гидролизу [3].

**Основная часть.** Лигнин древесины как предмет кинетического исследования в силу целого ряда причин физического и химического характера является весьма сложным объектом. Явление инактивации лигнина, под которым мы понимаем непрерывное уменьшение его реакционной способности в определенных условиях, описывалось в литературе [4].

Обычно явление инактивации лигнина описывают в процессах, в которых варочный щелок представляет собой кислые водные растворы солей сернистой кислоты. Впервые термин «черная варка» был предложен при описании именно таких процессов. Однако и при проведении органосольвентных варок, которые, как правило, протекают в кислой среде, также наблюдается инактивация лигнина (в частности, при проведении процессов делигнификации водными растворами уксусной кислоты).

Рассмотрим, какие основания позволяют утверждать, что при удалении лигнина водными растворами уксусной кислоты наблюдается его инактивация. В [5] приведены данные по описанию кинетики делигнификации древесины ели 75%-ными растворами уксусной кислоты в интервале температур 145...175 °С. Для описания формальной кинетики авторы исходили из предположения о топахимическом ходе реакции. Поэтому для описания данных (рисунок 1) были использованы уравнения: Колмогорова – Ерофеева; Праута – Томпкинса; Гистлинга – Браунштейна; трехмерной диффузии; сжимающего объема; степенного и экспоненциального типа; полихронной кинетики. При построении графических анаморфоз обнаружено, что ни одно из приведенных уравнений не в состоянии описать ход реакции в виде одной прямой. При обработке экспериментальных данных авторам приходилось делить анаморфозы на две части, т.е. наблюдался излом, что свидетельствует об уменьшении реакционной способности субстрата.

Ранее, в работе [5], нами показано, что предгидролиз еловой древесины водой при температуре 160 °С в течение 1,5 часа приводит к тому, что при последующей делигнификации 75%-ной уксусной кислотой



содержание остаточного лигнина в остатке вдвое выше по сравнению с контролем. Аналогичная предобработка 0,1%-ным раствором серной кислоты при 160 °С в течение 1,5 часа обнаруживает так называемую «черную варку» [3], делигнификация практически не происходит.

Очевидно, что в приведенных выше условиях добиться полного удаления лигнина невозможно, т.е. наблюдается явление кинетической остановки.

В [5; 6] приведены данные о соотношении лигнина Классона и кислоторастворимого лигнина в остатках после делигнификации лиственных пород древесины 75%-ной уксусной кислотой, причем установлено, что доля кислоторастворимого лигнина по ходу процесса непрерывно уменьшается. Показано, что выделение уксуснокислого лигнина в потоке сопровождается непрерывным увеличением молекулярной массы. При этом, исходя из данных нитробензольного окисления лигнинов, доля выхода ванилина падает, что свидетельствует в пользу протекания процессов конденсации в лигнинах по ходу варки. Кроме того, в полученных образцах лигнина возрастает также отношение С/Н.

Природа инактивации древесины в кислой среде до сих пор неясна. Так, в [5] приведены результаты многократного использования отработанного водного раствора уксусной кислоты при делигнификации древесины ели. При этом количество продуктов деструкции в варочном щелоке непрерывно возрастало. При пяти циклах варки выход и содержание остаточного лигнина в остатке практически не изменились. Таким образом, маловероятно, что продукты деструкции лигнина принимают участие в процессах инактивации. Очевидно, эти процессы происходят на уровне макромолекул в матрице древесного вещества.

Таким образом, под причиной инактивации следует понимать изменение природы реагирующего вещества в ходе реакции, которая приводит к падению его реакционной способности.

Классическим определением скорости реакции служит понятие о том, что скорость реакции определяется температурой, временем и природой вещества. Так как в приведенных примерах природа вещества непрерывно изменяется, то необходимо учитывать эти изменения в ходе процесса изучения кинетики.

До сих пор нам неизвестны случаи описания формальной кинетики делигнификации древесины в условиях его непрерывной инактивации. Поэтому целью данной работы является исследование возможности описания формальной кинетики делигнификации древесины ели 75%-ным раствором уксусной кислоты при повышенной температуре при помощи уравнений, учитывающих непрерывное падение реакционной способности лигнина.

**Экспериментальная часть.** Древесные опилки ели (фракция < 0,25 мм) предварительно обессмоленные спиртобензольной смесью обрабатывали в стальных автоклавах из нержавеющей стали 75%-ной уксусной кислотой. Температурный режим 145, 155, 165, 175 °С поддерживался с точностью  $\pm 0,1$  °С. Время начала процесса отмечали по достижению заданной температуры внутри автоклава. После завершения процесса остаток промывали 75%-ной уксусной кислотой, затем водой, 2%-ным раствором едкого натра и водой до нейтральной реакции по универсальной бумаге. В древесных остатках определяли содержание лигнина по Классону в модификации Комарова [7]. Кислоторастворимый лигнин в остатках отсутствовал. Результаты экспериментальных исследований приведены на рисунке 1.

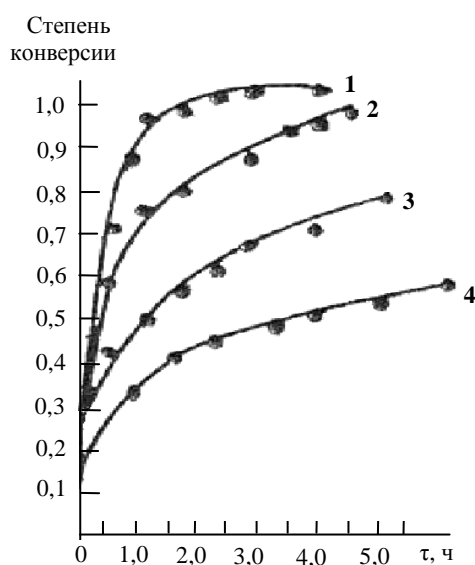


Рисунок 1. – Кинетические кривые делигнификации древесины ели 75%-ной серной кислотой при температуре 175 °С (1), 165 °С (2), 155 °С (3), 145 °С (4)

**Результаты и обсуждение.** Таким образом, за основу неформального описания процесса принято положение о том, что реакционная способность природного лигнина является переменной величиной и падает по ходу протекания реакции. Следовательно, классическое уравнение реакции первого порядка можно написать следующим образом:

$$dC/dt = -k(t)c,$$

где  $k(t)$  – коэффициент инактивации, учитывающий падение реакционной способности субстрата по ходу процесса.

Очевидно, что самый простой способ представления константы инактивации – использование монотонно убывающей функции, например, в виде полинома типа

$$k(t) = a + bt + ct^2. \quad (1)$$

Интегрирование дифференциального уравнения позволяет получить выражение

$$C = \exp - (at + bt^2 / 2 + ct^3/3), \quad (2)$$

где  $C$  – доля оставшегося лигнина в остатке;  $a, b, c$  – безразмерные параметры уравнения.

На параметры были наложены следующие ограничения:  $a > 0, b < 0, c < 0$ .

Возможно и более сложное описание: зависимость  $k(t)$  от  $t$  является монотонно убывающей функцией, в пределе стремящейся к нулю, либо имеет асимптоту, не равную нулю.

Таким образом, одна из функций, которая соответствует такому требованию, может иметь следующий вид:

$$k = d + a \exp(-ct). \quad (3)$$

После интегрирования данных уравнений получим для (3)

$$c = \exp - (dt - (a/c) \cdot \exp(-ct) + a/c), \quad (4)$$

где  $a, d, c$  – безразмерные параметры уравнения.

В качестве метода поиска параметров использовано последовательное квадратичное программирование.

В таблице 1 приведены результаты расчета для предложенных уравнений и формального уравнения первого порядка.

Таблица 1. – Расчетные параметры кинетики делигнификации древесины ели 75%-ной уксусной кислотой в интервале температур 145...175 °С

Температура, °С	Модель (1), (2)				Модель (3), (4)				Кинетическое уравнение первого порядка	
	$a$	$b$	$c$	$R^2_{испр}$	$d$	$a$	$c$	$R^2_{испр}$	$k$	$R^2_{испр}$
145	0,295	-0,033	0,00	0,95	0,058	1,380	3,723	0,95	0,166	0,72
155	0,569	-0,075	0,00	0,92	0,160	1,781	4,043	0,99	0,350	0,78
165	1,383	-0,238	0,00	0,92	0,520	2,188	5,218	0,93	1,003	0,79
175	2,249	-0,463	0,00	0,99	0,001	3,089	1,279	0,98	1,850	0,95

Очевидно, что коэффициенты корреляции между опытными и расчетными данными для моделей с учетом инактивации выше, чем при использовании обычной кинетической модели первого порядка.

Для первой модели коэффициент  $b$  позволяет оценить склонность к инактивации лигнина при различных температурах обработки. Например, при температуре 175 °С падение реакционной способности лигнина на порядок выше, чем при температуре 145 °С. Наибольшая склонность к инактивации проявляется в интервале температур 155...165 °С – увеличение значения коэффициента примерно в 3,2 раза, в то время как при увеличении температуры в диапазоне 145...155 °С – в 2,3 раза, а при увеличении температуры в интервале 165...175 °С – в 1,9 раза.

Аналогичные данные демонстрирует и анализ второй модели. При этом величина параметра  $d$ , равная 0,001, свидетельствует в пользу кинетической остановки реакции при температуре 175 °С.

**Выводы.** Использование традиционного уравнения первого порядка не позволяет с достаточной точностью сопоставить опытные и расчетные данные в условиях инактивации лигнина. При переходе

к моделям, которые учитывают непрерывную потерю реакционной способности лигнина, можно получить достаточно высокую корреляцию между экспериментом и расчетом, что позволяет говорить о механизме делигнификации, который включает в себя стадию падения реакционной способности природного лигнина в ходе процесса его удаления водными растворами уксусной кислоты.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Кабанов, В.А. Практикум по высокомолекулярным соединениям / В.А. Кабанов. – М. : Химия, 1985. – 224 с.
2. Kudryavtsev, Y.V. On the kinetics of polyacrylamide alkaline hydrolysis / Y.V. Kudryavtsev, A.D. Litmanovich, N.A. Plate // *Macromolecules*. – 1998. – № 14, V. 31. – P. 4642–4644.
3. Шарков, В.И. Химия гемицеллюлоз / В.И. Шарков, Н.И. Куйбина. – М. : Лесная промышленность, 1972. – 440 с.
4. Шорыгина, Н.Н. Реакционная способность лигнина / Н.Н. Шорыгина, В.М. Резников, В.В. Елкин. – М. : Наука, 1976. – 368 с.
5. Зильберглейт, М.А. Исследование процесса делигнификации древесины водными растворами уксусной кислоты / М.А. Зильберглейт, Б.С. Симхович, В.М. Резников // *Химия древесины*. – 1986. – № 6. – С. 28–34.
6. Симхович, Б.С. Исследование процесса делигнификации древесины водными растворами уксусной кислоты / Б.С. Симхович, М.А. Зильберглейт, В.М. Резников // *Химия древесины*. – 1986. – № 3. – С. 34–38.
7. Оболенская, А.В. Лабораторные работы по химии древесины и целлюлозы / А.В. Оболенская, З.П. Ельницкая, А.А. Леонович. – М. : Экология, 1991. – 319 с.

Поступила 15.02.2018

**KINETICS OF DELIGNIFICATION OF SPRUCE WOOD  
UNDER CONDITIONS OF INACTIVATION OF LIGNIN**

*M. ZILBERGLEIT, S. JAKUBOVSKI*

*Features of kinetics of reaction of inactivation on an example of delignification of wood of a fir-tree by aqueous solutions of acetic acid are considered. Under inactivation should be understood as a change in the nature of the reacting substance during the reaction, which leads to a drop in its reactivity. Numerous examples of delignification reaction in aqueous solutions of acetic acid, which are accompanied by autosampling, are given. To describe the reaction kinetics, it is proposed to use kinetic equations in which the reaction rate constant is a monotone time function. It is shown that the adequacy of the proposed kinetic description significantly exceeds the traditional description of reaction kinetics as a first-order reaction.*

**Keywords:** reaction kinetics, lignin inactivation, aqueous solutions of acetic acid.

УДК665.637.88

## ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ НИЗКОМОЛЕКУЛЯРНОГО ПОЛИЭТИЛЕНА НА СВОЙСТВА ОСТАТКА ВИСБРЕКИНГА В ПРОЦЕССЕ ЕГО ОКИСЛЕНИЯ

*И.В. КОВАЛЁВА; канд. техн. наук, доц. Ю.А. БУЛАВКА; А.С. МОСКАЛЕНКО  
(Полоцкий государственный университет)*

*Изучено влияние низкомолекулярного полиэтилена, произведенного на заводе «Полимир» ОАО «Нафтан», на свойства остатка висбрекинга производства ОАО «Нафтан» в процессе его окисления. Подтверждена эффективность использования для регулирования группового состава и дисперсной структуры окисленного остатка висбрекинга побочного продукта производства полиэтилена высокого давления – низкомолекулярного полиэтилена, который распределяется в масляной части дисперсионной среды, изменяет состав и физико-химические свойства остатка висбрекинга, оказывает значительное влияние на свойства полученного окисленного продукта. Установлена концентрация низкомолекулярного полиэтилена, способствующая интенсификации процесса окисления остатка висбрекинга. Определено возможное направление рационального использования продукта окисления остатка висбрекинга, модифицированного низкомолекулярным полиэтиленом.*

**Ключевые слова:** *остаток висбрекинга, низкомолекулярный полиэтилен, окисление, битум.*

**Введение.** Углубление переработки нефти и, как следствие, снижение выпуска котельного топлива – одна из главных задач, стоящих перед белорусскими нефтеперерабатывающими заводами. Основной целью процесса висбрекинга является снижение вязкости гудрона и применение полученного атмосферного остатка в качестве компонента котельного топлива, однако возможны и другие более эффективные направления использования остатка висбрекинга, в частности для получения нефтяных битумов [1].

Общеизвестно, что введение в битум полимерных добавок позволяет направленно регулировать структурно-механические свойства материала [2]. Актуальным направлением развития нефтехимии сегодня остается использование отходов и подобных продуктов полимерных производств. Одним из таких продуктов является низкомолекулярный полиэтилен (НМПЭ) – побочный продукт производства полиэтилена высокого давления, состоящий из смеси насыщенных углеводородов, преимущественно нормального строения с 10...20 атомами углерода, с общим содержанием  $\text{CH}_3$  4...8 единиц на 100 атомов углерода, имеющий высокую температуру вспышки и низкую зольность [3–7].

Цель данного исследования – изучить влияние низкомолекулярного полиэтилена (побочного продукта двухзонного процесса получения полиэтилена высокого давления в реакторе автоклавного типа цеха № 102 завода «Полимир» ОАО «Нафтан») на свойства остатка висбрекинга производства ОАО «Нафтан» в процессе его окисления и проанализировать показатели качества полученных битумных материалов.

**Методы исследований.** В качестве объекта исследования для проведения процесса окисления использовали атмосферный висбрекинг – остаток с установки «Висбрекинг-Термокрекинг» ОАО «Нафтан» со следующими характеристиками: плотность при 20 °С – 992 кг/м<sup>3</sup>; кинематическая вязкость при 80 °С – 178 мм<sup>2</sup>/с; коксуемость – 13,8% масс.; содержание серы – 2,24% масс.; температура вспышки – 176 °С; групповой состав, % масс.: масла – 57,6; смолы – 32,3; асфальтены – 10,1.

Для регулирования дисперсной структуры и группового состава в процессе окисления остатка висбрекинга применяли добавку низкомолекулярного полиэтилена – побочного продукта двухзонного процесса получения полиэтилена высокого давления в реакторе автоклавного типа цеха № 102 завода «Полимир» ОАО «Нафтан» с температурой каплепадения 38 °С в концентрациях 2, 4, 6 и 8% масс. на остаток висбрекинга.

Окисление осуществляли на лабораторной установке в реакторе периодического действия с рабочим объемом 400 мл при температуре 240±5 °С в течение 12 часов с расходом воздуха 1,5 л/мин для полного перемешивания реакционной смеси и моделирования работы промышленного реактора.

Через каждые 4 часа процесса окисления осуществляли отбор пробы для анализа группового состава по методу Маркуссона с выделением асфальтенов, нейтральных смол и масел [8].

Для окисленного в течение 12 часов остатка висбрекинга определены основные эксплуатационные показатели качества для битумов: температура размягчения по кольцу и шару по ГОСТ 11506-73; растяжимость при 25 °С по ГОСТ 11505-75; глубина проникания иглы при 25 °С по ГОСТ 11501-78; температура хрупкости по Фраасу по ГОСТ 11507-78; рассчитан индекс пенетрации по ГОСТ 22245 и определен интервал пластичности.

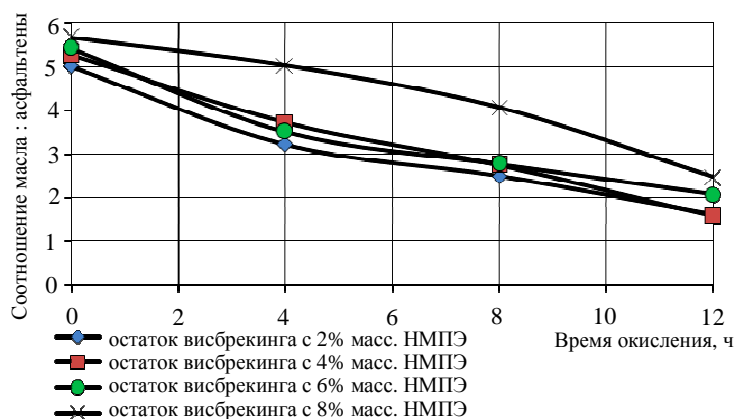
**Результаты и их обсуждение.** Результаты определения группового состава по методу Маркуссона исходных и окисленных образцов остатка висбрекинга с различными концентрациями низкомолекулярного полиэтилена представлены в таблице 1.

Таблица 1. – Результаты анализа группового состава исходных и окисленных образцов по Маркуссону

Группа углеводородных компонентов	Исходный образец без окисления	Время окисления, ч		
		4	8	12
<i>Остаток висбрекинга с 2% масс. НМПЭ</i>				
Асфальтены	13,746	19,349	24,198	30,231
Масла	68,946	62,315	60,461	48,571
Смоли	17,308	18,336	15,341	21,198
<i>Остаток висбрекинга с 4% масс. НМПЭ</i>				
Асфальтены	13,145	16,617	21,451	28,994
Масла	69,295	61,818	59,048	45,535
Смоли	17,560	21,565	19,501	25,471
<i>Остаток висбрекинга с 6% масс. НМПЭ</i>				
Асфальтены	13,113	18,180	22,358	25,559
Масла	71,161	63,865	62,106	53,053
Смоли	15,726	17,955	15,537	21,388
<i>Остаток висбрекинга с 8% масс. НМПЭ</i>				
Асфальтены	12,552	13,743	16,642	23,106
Масла	71,205	69,114	67,642	57,157
Смоли	16,243	17,143	15,716	19,736

По истечении 12 часов окисления остатка висбрекинга содержание масел благодаря процессам окислительной поликонденсации, радикальной циклизации и окислительному дегидрированию уменьшается на 19,73...34,29%, что приводит к увеличению содержания смол в 1,21...1,45 раза и асфальтенов в 1,84...2,21 раза. При этом максимальные значения по превращению групп углеводородов установлены при окислении остатка висбрекинга с концентрацией 4% масс. НМПЭ, а минимальные – с 8% масс. Данная закономерность свидетельствует о том, что НМПЭ в концентрациях до 4% масс. способствует интенсификации процесса окисления остатка висбрекинга, а при более высоких концентрациях «затормаживает» процесс окисления.

Изучение кинетики процесса окисления остатка висбрекинга показало, что в первые четыре часа быстрее протекают реакции окисления молекул НМПЭ и углеводородов, принадлежащих к группе масел (парафиновые, нафтеновые и ароматические фрагменты, сочетающиеся в различных соотношениях), с образованием значительного количества радикалов, способных к сильным межмолекулярным взаимодействиям. После восьми часов окисления интенсивно идут реакции образования асфальтенов из конденсированных циклических систем смол, содержащих ароматические, циклопарафиновые, гетероциклические кольца, соединенные между собой сравнительно короткими алифатическими мостиками. По истечении двенадцати часов окисления остатка висбрекинга содержание асфальтенов, состоящих преимущественно из шестичленных ароматических и нафтеновых колец, шестичленных гетероциклов с парафиновыми цепями различной степени разветвленности, может достигать до 30% масс. Влияние НМПЭ на процесс окисления остатка висбрекинга, вероятно, обусловлено образованием укрупненных конгломератов молекул олигомера в объеме остатка висбрекинга в первые часы окисления, дальнейшей термоокислительной деструкцией самого НМПЭ и растворением в дисперсионной среде. Зависимость изменения соотношения масла : асфальтены в процессе окисления остатка висбрекинга с различными концентрациями низкомолекулярного полиэтилена приведена на рисунке 1.



**Изменения соотношения масла : асфальтены в процессе окисления остатка висбрекинга с различными концентрациями низкомолекулярного полиэтилена**

Как известно, низкомолекулярный полиэтилен вещество неполярное и растворяется преимущественно в масляных компонентах остатка висбрекинга [6], увеличивая тем самым долю масляной части, что приводит к росту соотношения масла : асфальтены, определяя при этом растворяющую способность дисперсионной среды. Низкомолекулярный полиэтилен, адсорбируя масла остатка висбрекинга, образует отдельную дисперсную фазу из высокомолекулярных молекул олигомера, что видно из рисунка 1, при концентрациях более 8% масс. НМПЭ замедляет темпы окисления остатка висбрекинга. Вероятно, увеличивающиеся размеры конгломератов НМПЭ снижают силы межмолекулярного взаимодействия между дисперсной фазой и дисперсионной средой, и для остатка висбрекинга концентрация 6% масс. НМПЭ является критической и исчерпывает резервы окисления остатка.

В таблице 2 приведены основные показатели качества битумов, полученных на основе окисления остатка висбрекинга, модифицированного различными концентрациями низкомолекулярного полиэтилена.

Таблица 2. – Основные показатели качества битумов, полученных на основе окисления остатка висбрекинга, модифицированного различными концентрациями низкомолекулярного полиэтилена

Показатели	Окисленный в течение 12 часов остаток висбрекинга, содержащий НМПЭ				Норма для битума нефтяного строительного БН 70/30 (ГОСТ 6617-76)	Нормативный документ
	2% масс.	4% масс.	6% масс.	8% масс.		
Глубина проникания иглы при 25 °С, 0,1 мм	20,8	14,7	33,5	113	21...40	ГОСТ 11501-78
Температура размягчения по кольцу и шару, °С	63,5	73,0	72,3	46,3	70...80	ГОСТ 11506-73
Растяжимость при 25 °С, см	8,4	4,4	6,4	10,2	не менее 3	ГОСТ 11505-75
Температура хрупкости по Фраасу, °С	-16	-9	-12	-18	не нормируется	ГОСТ 11507-78
Индекс пенетрации	-0,19	0,68	2,20	0,02	не нормируется	ГОСТ22245-90
Интервал пластичности, Δt °С	79,5	82,0	84,3	64,3	не нормируется	–

Данные таблицы 2 подтверждают вывод об интенсификации низкомолекулярным полиэтиленом процесса окисления остатка висбрекинга, при этом образец с 4% масс. НМПЭ находится в активированном состоянии, вероятно, обусловленном межструктурной пластификацией, сформировалась прочная структура битума, образец имеет минимальное соотношение масла : асфальтены (см. рисунок 1) и, как следствие, наиболее высокую температуру размягчения по кольцу и шару, температуру хрупкости по Фраасу, минимальную глубину проникания иглы и растяжимость при 25 °С.

С ростом соотношения масла : асфальтены, что видно на образцах окисленного в течение 12 часов остатка висбрекинга, содержащего 6 и 8% масс. НМПЭ, наблюдается: рост показателя пенетрации, определяющей степень твердости битума; увеличение дуктильности, характеризующей пластичность материала; снижение тепловых свойств, а именно уменьшение температуры размягчения (показателя высокотемпературных свойств) и температуры хрупкости (показателя низкотемпературных свойств).

Сопоставление показателей качества битумов, полученных на основе окисления остатка висбрекинга, модифицированного различными концентрациями НМПЭ, с нормативными требованиями на битумы, позволило определить возможную область применения продукта, полученного окислением в течение 12 часов остатка висбрекинга, содержащего 6% масс. НМПЭ. Это нефтяные строительные битумы, в частности марки БН 70/30, требования к которым приведены в таблице 2. Данный образец имеет наиболее широкий интервал пластичности – 84,3°С, оцениваемый по разнице между температурами размягчения и температурой хрупкости. Так как значение индекса пенетрации более 2, то битум проявляет выраженные коллоидные свойства «гелей», представляет собой связнодисперсную систему, частицы которой взаимодействуют между собой за счет межмолекулярных сил, образуя в дисперсионной среде пространственные сетки. Модифицирование низкомолекулярным полиэтиленом позволяет повысить гидрофобные и герметизирующие свойства материалов, что ценно для их использования в качестве битумной гидроизоляции.

Для более широкого использования продукта окисления остатка висбрекинга, модифицированного НМПЭ, необходимо дополнительное изучение изменений его свойств с течением времени, обусловленных «старением» материалов. Общеизвестно, сырье со значительной степенью неопределенности проявляет низкую термоокислительную стабильность, что свидетельствует о возможном введении стабилизирующих добавок.

**Заключение.** Изучение влияния низкомолекулярного полиэтилена на свойства остатка висбрекинга в процессе его окисления позволило установить следующее:

- эффективно использование для регулирования группового состава и дисперсной структуры окисленного остатка висбрекинга низкомолекулярного полиэтилена – побочного продукта получения полиэтилена высокого давления, который распределяется в масляной части дисперсионной среды, изменяет

состав и физико-химические свойства остатка висбрекинга, оказывает значительное влияние на свойства полученного окисленного продукта;

- низкомолекулярный полиэтилен в концентрациях до 4% масс. способствует интенсификации процесса окисления остатка висбрекинга, а при более высоких концентрациях «затормаживает» процесс окисления;

- окисленный остаток висбрекинга, модифицированный 6% масс. НМПЭ, может использоваться для получения нефтяных строительных битумов, применяемых в качестве гидроизоляции после подтверждения дополнительными испытаниями на термоокислительную стабильность к процессам старения.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Комплексная переработка остаточных продуктов процессов вторичной переработки нефти : курс лекций для студентов специальности 1-48 01 03 «Химическая технология природных энергоносителей и углеродных материалов» и магистрантов специальности 1-48 80 05 «Химическая технология топлив и высокоэнергетических веществ» / А.А. Ермак [и др.]. – Новополоцк : ПГУ, 2017. – 35 с.
2. Булавка, Ю.А. Современные альтернативные направления промышленного использования низкомолекулярного полиэтилена / Ю.А. Булавка, Ю.С. Петровская, В.С. Ширабордина // Вестник Полоцкого государственного университета. Сер. В, Промышленность. Прикладные науки. – 2017. – № 11. – С. 103–110.
3. Павлов, А.В. Основные направления использования низкомолекулярного полиэтилена и его влияние на свойства нефтепродуктов / А.В. Павлов, А.А. Ермак // Вестник Полоцкого государственного университета. Сер. В, Прикладные науки. – 2008. – № 2. – С. 123–127.
4. Получение композиционных материалов на основе отходов нефтехимии и нефтепереработки / Ю.А. Булавка [и др.] // Нефтехимический комплекс : науч.-техн. бюл. Приложение к журналу «Вестник Белнефтехима». – 2017. – № 1 (16). – С. 10–12.
5. Нефтяные композиции на основе низкомолекулярного полиэтилена / Ю.А. Булавка [и др.] // Наука инновации. – 2017. – Т. 6, № 172. – С. 31–33.
6. Евдокимова, Н.Г. Разработка научно-технологических основ производства современных битумных материалов как нефтяных дисперсных систем : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.17.07 / Н.Е. Евдокимова ; Рос. гос. ун-т нефти и газа им. И.М. Губкина. – М., 2015. – 53 с.
7. Modifying additive of based on petrochemical waste for to produce road bitumen of meets the requirements of GOST 33133-2014 / Yu. Bulauka [et al.] // Oil and Gas Horizons : Abstract book of 9<sup>th</sup> International Youth Scientific and Practical Congress, Moscow, November 28–30, 2017 ; Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University). – Moscow, 2017. – P. 67.
8. Дяров, И.Н. Химия нефти : рук. к практическим и лабораторным занятиям / И.Н. Дяров, Р.Ф. Хамидуллин, Н.Л. Солодова. – Л. : Химия, 1990. – 240 с.

Поступила 18.01.2018

#### THE INVESTIGATION OF THE LOW MOLECULAR WEIGHT POLYETHYLENE ON THE VISBREAKING RESIDUE PROPERTIES DURING OXIDATION

I. KOVALYOVA, Y. BULAUKA, H. MASKALENKA

*The low molecular weight polyethylene, manufactured on Polymir influence on visbreaking residue, produced on Naftan during its oxidation is investigated. The by-product of high pressure polyethylene production effectiveness in the group composition and disperse structure regulation of the oxidized visbreaking residue is improved. The by-product – low molecular weight polyethylene, which distributes in the dispersion medium oil part, transforms the visbreaking residue composition and both physical and chemical properties, impacts greatly on the oxidized product properties. The low molecular weight polyethylene concentration, which intensifies visbreaking residue oxidation process, was determined. The rational usage of the visbreaking residue oxidation process product modified by the low molecular weight polyethylene was indentified.*

**Keywords:** visbreaking residue, low molecular weight polyethylene, oxidation, bitumen.

УДК 66.045.53:66-97

## МОДЕРНИЗАЦИЯ ГРАДИРЕН НЕФТЕПЕРЕРАБАТЫВАЮЩИХ ЗАВОДОВ

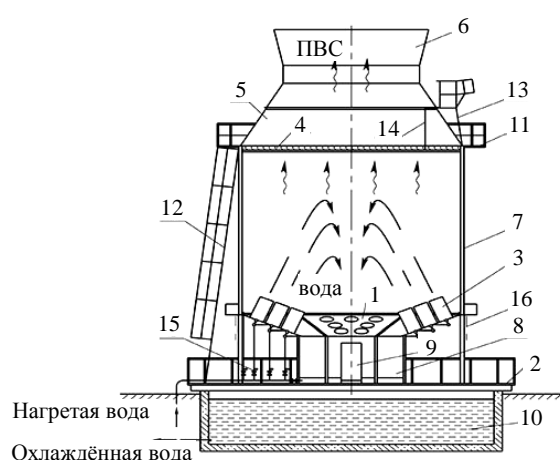
канд. техн. наук А.В. МИТИНОВ; канд. техн. наук, доц. Е.В. САФРОНОВА  
(Полоцкий государственный университет)

Приводится анализ вариантов модернизации вентиляторных градирен нефтехимических предприятий. Рассмотрены особенности эжекции в градирнях, предложены возможные варианты улучшения работы эжекционных градирен, связанные с конструктивным и материальным исполнением эжекционных сопел в градирнях.

**Ключевые слова:** вентиляторная градирня, эжекционная градирня, эжекция, сопло, оросительная форсунка, полиамид, углепластик, полипропилен.

Для современных нефтеперерабатывающих заводов замкнутый водооборотный цикл является одним из основных компонентов используемых технологий, во многом определяющим эффективность работы предприятий, особенно в летний период, так как для предприятий Республики Беларусь именно этот период является проблемным. Технологическими процессами к параметрам водооборотного цикла предъявляются требования четкости соблюдения температурного графика в различные периоды функционирования. Неэффективно работающий водооборотный цикл может приводить к потере производительности установок и ухудшению качества продукции.

В системах оборотного водоснабжения промышленных и энергетических предприятий для охлаждения оборотной воды используются градирни: башенные, вентиляторные, эжекционные или брызгальные бассейны. Башенные градирни и брызгальные бассейны более широкое применение нашли на предприятиях энергетики, а вентиляторные и эжекционные – на промышленных предприятиях нефтехимической отрасли [1–2]. Эжекционные градирни – это открытый охладитель воды испарительного типа, в котором вода и воздух движутся прямотоком (рисунок 1).



- 1 – водослив; 2 – площадка технологическая; 3 – канал эжекционный; 4 – каплеуловитель;  
5 – конфузор; 6 – диффузор; 7, 8 – ограничения корпуса и ветровых перегородок; 9 – дверь,  
10 – бассейн для сбора охлажденной воды; 11 – площадка верхняя; 12 – лестница; 13 – лестница верхняя;  
14 – лестница внутренняя; 15 – водораспределительная система

Рисунок 1. – Эжекционная градирня

Охлаждение происходит за счёт создаваемой среды, приближенной к условиям вакуума специальными форсунками (обеспечивающими площадь тепломассообмена, каждая  $450 \text{ м}^2$  на  $1 \text{ м}^3$  прокачиваемой жидкости). Температура оставшейся массы понижается до  $8 \text{ }^\circ\text{C}$ . Эжекционные градирни выдерживают наибольшие гидравлические нагрузки и способны охлаждать воду с большим перепадом и с очень высоких температур (до  $90 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Это обусловлено как отсутствием оросителя, так и большой суммарной площадью поверхности мелкодисперсных капель и брызг и высокими скоростями водовоздушных потоков. Затраты электроэнергии на эксплуатацию систем оборотного водоснабжения при грамотной организации схемы водоснабжения и автоматики не превышают затрат на типовые вентиляторные установки [1–2].

Вентиляторные градирни с любым размещением вентилятора представляют собой открытый охладитель испарительного типа, в котором вода и воздух движутся противотоком (рисунок 2). Процесс



охлаждения происходит за счёт испарения части воды при стекании её тонкой плёнкой или каплями по специальному оросителю, вдоль которого в противоположном движению воды направлении подаётся поток воздуха. При испарении 1% воды температура оставшейся массы понижается примерно на 5 °С.

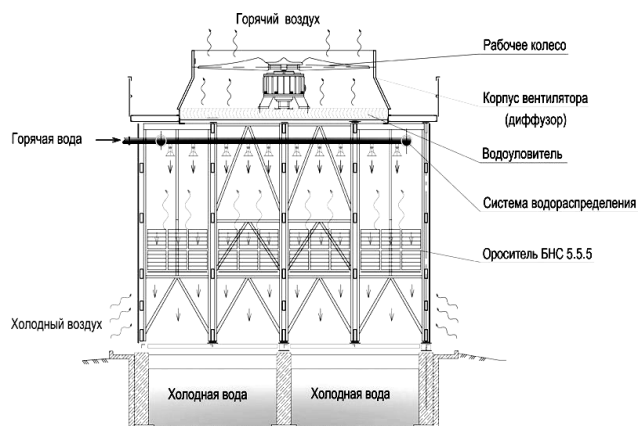
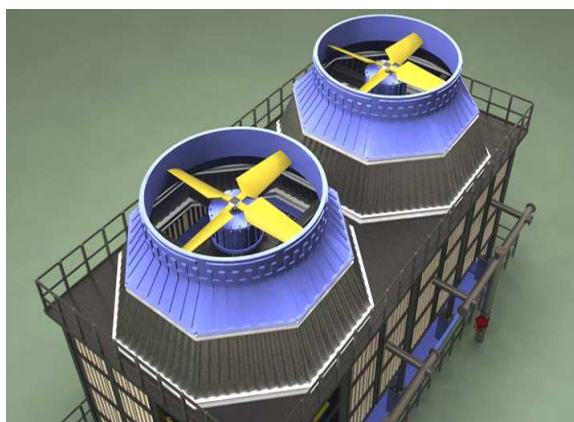


Рисунок 2. – Вентиляторная градирня с верхним размещением вентилятора

При выработке ресурса вентиляторной градирни встает вопрос о её замене или модернизации. Ввиду того, что ресурс машинного оборудования вентиляторных градирен значительно меньше ресурса строительных конструкций, на многих белорусских предприятиях реализован вариант модернизации градирен путем демонтажа вентиляторов и оросителей и превращения градирен в брызгально-капельные [3]. Такой подход во многом является вынужденным и определяемым экономической ситуацией на предприятиях и совершенно не практикуется во многих развитых странах. Однако в случае отечественных НПЗ такого рода модернизацию можно признать приемлемой в условиях кризисных явлений и при снижении объема переработки нефти, а также вследствие повышения энергоэффективности процессов нефтепереработки, позволяющих временно применять неоптимальные и не самые энергоэффективные решения во вспомогательных процессах нефтепереработки. С другой стороны, увеличение количества вторичных процессов и соответствующий рост удельных энергозатрат на единицу товарной продукции заставляют обращать внимание на эффективность оборотного водоснабжения и искать ресурсы ее повышения. Такие ресурсы могут быть выявлены в результате технологического аудита и анализа работы принятых при выполнении модернизации технических решений. Такой анализ технических решений позволяет обратить внимание на ряд аспектов, среди которых наиболее важными оказываются напор, конструкция и конструктивные параметры сопел, материальное исполнение сопел.

Выполненная на ОАО «Нафтан» модернизация градирен вентиляторного типа не предусматривала изменения насосного оборудования. Существующего напора, соответствующего давлению 0,2 МПа, достаточно для вентиляторной и брызгальной градирен, но не для эжекторной (только при малом размере сопел и, соответственно, высоком гидравлическом сопротивлении сопел, что ведет к снижению расхода).

Режим охлаждения в новых градирнях такой, как и в брызгальном бассейне, но имеет слабые стороны из-за наличия ограждающих конструкций, ограничивающих обмен с атмосферой.

В новых градирнях в качестве распылителей воды используются центробежно-струйные распылители, рабочим органом которых являются сопла круглого сечения, выполненные из полиамида, расположенные по окружности корпуса форсунки. Мелкодисперсные капли воды равномерно заполняют пространство градирни. Тепломассообмен осуществляется на высокоразвитой поверхности капель. При этом скоростной поток капель эжектирует окружающий воздух внутрь градирни, создавая дополнительный расход воздуха. Недостатками такой конструкции является нерациональное расположение форсунок с точки зрения контакта с потоками свежего (ненасыщенного парами воды) воздуха, поступающего из воздухозаборных окон, а также недостаточная эффективность эжекции при использовании круглых сопел. Для улучшения эжекции наиболее целесообразно использовать плоскощелевые сопла. Их эффективность подробно рассмотрена и доказана в исследованиях, представленных в [4; 5].

Принцип эжекции струями разного сечения показан на представленных ниже рисунках 3 и 4 (приняты следующие условные обозначения:  $d_c$  – диаметр сопла, м;  $\delta$  – толщина вовлеченного в поток жидкости газа, м;  $b$  – длина сопла, м;  $a$  – ширина сопла, м).

Для цилиндрического сопла:

- сечение сопла:

$$F_c = 0,785 \cdot d_c^2 ; \quad (1)$$

- сечение, захваченное струей газа:

$$F_z = 0,785 \cdot [(d_c + 2\delta)^2 - d_c^2]; \quad (2)$$

$$\frac{F_z}{F_c} = \frac{(d_c + 2 \cdot \delta)^2 - d_c^2}{d_c^2} = \left( \frac{d_c + 2 \cdot \delta}{d_c} \right)^2 - 1. \quad (3)$$

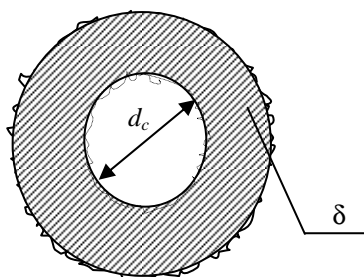


Рисунок 3. – Механизм захвата газа струей жидкости круглого сечения

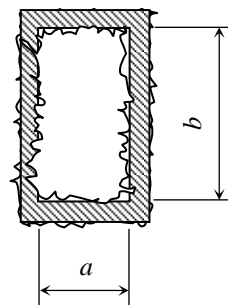


Рисунок 4. – Механизм захвата газа струей жидкости плоского сечения

Как известно, эффективность эжекции оценивается с помощью коэффициента эжекции, который определяется по формуле как отношение расхода газа к расходу жидкости:

$$K_э = \frac{Q_z}{Q_эж}, \quad (4)$$

$$K_э = \left( 1 + \frac{2 \cdot \delta}{d_c} \right)^2 - 1. \quad (5)$$

Для плоского сопла:

$$K_э = \frac{(b + 2 \cdot \delta) \cdot (a + 2 \cdot \delta) - a \cdot b}{a \cdot b} = \left( \frac{b + 2 \cdot \delta}{b} \right) \cdot \left( \frac{a + 2 \cdot \delta}{a} \right) - 1, \quad (6)$$

$$K_э = \left( 1 + \frac{2 \cdot \delta}{b} \right) \cdot \left( 1 + \frac{2 \cdot \delta}{a} \right) - 1. \quad (7)$$

Для упрощения процедуры сравнения необходимо сделать некоторые допущения:  $b/a = 10$  (для эффективной эжекции); сечение круглого сопла равно сечению плоского сопла; толщина прилипшего слоя газа в обоих случаях составляет:  $\delta_1$  – для цилиндрического сопла;  $\delta_2$  – для плоского сопла.

Выполняя математические преобразования, получим:

$$\frac{K_{э,пл}}{K_{э,цил}} = \frac{\left( 1 + \frac{2 \cdot \delta_2}{b} \right) \cdot \left( 1 + \frac{2 \cdot \delta_2}{a} \right) - 1}{\left( 1 + \frac{2 \cdot \delta_1}{d_c} \right)^2 - 1}. \quad (7)$$

В диапазоне изменения  $d_c$  от 2 до 20 мм, принимая, что толщина прилипшего слоя газа больше при работе с плоским соплом, получим коэффициент эжекции для плоского сопла, в несколько раз больший, чем для цилиндрического.

Учитывая изложенные замечания о недостатках конструкции выполненной модернизации брызгальных градилен, представляется интересным рассмотреть вопрос их совершенствования с сохранением достоинств, а именно низкой энергоемкости и приемлемого уровня эффективности в осенний, весенний и зимний периоды при возможности повышения эффективности работы в летний период на примере существующего блока водоподготовки, включающего две группы градилен – новых вентиляторных и капельно-брызгальных.

Модернизированные градирины оснащены полимерными или композиционными или композиционными распылительными форсунками круглого сечения, которые можно заменить форсунками прямоугольного сечения, что позволит изменить форму струи и увеличить её эжекционную способность. Целесообразно располагать форсунки по периметру воздухоподводящих окон, что увеличит эжекцию ненасыщенного пара воды воздуха.

Давление в напорной линии насосов, подающих воду на сопла, составляет 0,2 МПа. Что характерно для брызгальных градирен. Для смещения режима работы градирни в сторону эжекторной необходимо увеличение скорости истечения и, соответственно, давления на форсунках. Однако даже при обеспечении тем или иным способом повышения давления существует другая проблема – недостаточная конструктивная прочность форсунок. По отзывам эксплуатирующих служб, при существующих режимах и давлении 0,2 МПа наблюдаются случаи срыва части корпуса форсунки, что не позволяет повышать давление и ухудшает теплообмен между жидкостью и воздухом. Кроме этого, простое увеличение скорости истечения из центробежных форсунок приведет к уменьшению размера капель, полному испарению капель без охлаждения воды, увеличению капельного уноса из градирни [6].

Исследование существующей проблемы низкой конструкционной прочности форсунок с позиций полимерного материаловедения позволило выявить причину существующих ограничений на пути модернизации градирен за счет повышения скорости истечения из сопел. Анализ материального исполнения форсунок выявил крайне неудачный выбор в качестве конструкционного материала полиамида 6. Среди большого числа промышленных конструкционных полимеров именно полиамид 6 может быть охарактеризован как самый влагопоглощающий. Известно, что в нормальных условиях из воздуха полиамид 6 может поглощать до 2% влаги, а при использовании в горячей воде до 10% [7], что, естественно, вызовет резкое снижение прочностных характеристик материала.

Учитывая условия работы форсунок, целесообразно в качестве материала для их изготовления применять неполярные гидрофобные полимеры, например, полипропилен или его сополимеры. Такой подход гарантирует высокую прочность во всем диапазоне работы форсунок и обеспечивает отсутствие отложений на их поверхности.

**Заключение.** Обобщив полученные результаты проведенного исследования, необходимо подчеркнуть, что ОАО «Нафтан» имеет потенциал для повышения эффективности работы брызгальных градирен.

В качестве рекомендаций по улучшению работы градирен нефтеперерабатывающих заводов можно предложить следующие мероприятия, позволяющие обеспечить температурный график: изменение режима (давления) на форсунках путём последовательного подключения имеющихся насосов либо применением частотного регулирования; изменение конструкции форсунок с круглых на плоские; расположение их в воздухоподводящих окнах; замена материала исполнения форсунок.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Пономаренко, В.С. Градирни промышленных и энергетических предприятий / В.С. Пономаренко, Ю.И. Арефьев. – М. : Энергоатомиздат, 1998.
2. Гладков, В.А. Вентиляторные градирни / В.А. Гладков, Ю.И. Арефьев, В.С. Пономаренко. – М. : Стройиздат, 1976.
3. Спиридонов, А.В. Повышение энергоэффективности градирен завода «Полимир» ОАО «Нафтан» / А.В. Спиридонов, Е.В. Сафронова // Вестник Полоцкого государственного университета. Сер. В, Промышленность. Прикладные науки. – 2017. – № 3. – С. 120–125.
4. Сафронова, Е.В. Моделирование процессов переноса при струйном аэрировании: дис. ...канд. техн. наук : 05.17.08 / Е.В. Сафронова ; Полоц. гос. ун-т. – Новополоцк, 2004. – 125 с.
5. Сафронова, Е.В. Конструирование и расчет эффективных струйных аппаратов системы «жидкость – газ» / Е.В. Сафронова, А.В. Спиридонов, А.В. Митинов // Вестник Полоцкого государственного университета. Сер. В, Промышленность. Прикладные науки. – 2016. – № 11. – С. 190–194.
6. Лаптев, А.Г. Устройство и расчет промышленных градирен / А.Г. Лаптев, И.А. Ведьгаева. – Казань : Казан. гос. энергет. ун-т, 2004.
7. Калинин, Э.Л. Свойства и переработка термопластов / Э.Л. Калинин, М.Б. Саковцева. – Л. : Химия, 1983.

Поступила 14.02.2018

#### MODERNIZATION OF GRADIREN OF OIL-REFINING PLANTS

A. MITINOV, E. SAFRONOVA

*This article gives an analysis of the options for upgrading the cooling towers of petrochemical enterprises. In the article are considered features of ejection in cooling towers, possible options for improving the operation of ejection cooling towers, related to the design and material execution of ejection nozzles in cooling towers are suggested.*

**Keywords:** cooling tower, ejection cooling tower, ejection, nozzle, irrigation nozzle, modernization, polyamide, carbon fiber, polypropylene, polyethylene.

## ИНФОРМАЦИЯ

### НАУЧНЫЕ ШКОЛЫ НИИ – ПГУ В МАШИНОСТРОЕНИИ: СОЗДАНИЕ И РАЗВИТИЕ

Научная школа – одна из форм научных сообществ, генерирующих новое знание. Это объединение исследователей, выполняющее функции продуцирования и распространения новых знаний и обладающее способностью к самовоспроизводству. Такой школой можно считать и машиностроительный факультет Полоцкого государственного университета, за время существования которого защищено 9 докторских диссертаций, в том числе 4 – выпускниками факультета. Диссертации защитили: *Ф.И. Пантелеенко, В.И. Коробко, В.Н. Коровкин, В.П. Иванов, В.Я. Прушак, М.Л. Хейфец, Н.Н. Попок, В.А. Данилов, В.М. Константинов*. Ученые *Ф.И. Пантелеенко* и *В.Я. Прушак* избраны членами-корреспондентами НАН Беларуси. Присвоено звание профессора канд. техн. наук *Б.П. Чемисову*, канд. техн. наук *А.И. Голембевскому*, канд. техн. наук *Ю.П. Ощепкову*.

Созданы научные школы и направления:

- ♦ **материаловедение**  
(проф. Ю.П. Ощепков);
- ♦ **самофлюсующиеся сплавы на железной основе**  
(чл.-кор. НАН Беларуси Ф.И. Пантелеенко);
- ♦ **материаловедение сплавов для упрочняющих покрытий**  
(проф. В.М. Константинов, доц. А.Л. Лисовский);
- ♦ **электроферромагнитное упрочнение деталей машин**  
(проф. Б.П. Чемисов, доц. А.В. Абрамова);
- ♦ **мобильное производство на основе модульных технологий и оснастки**  
(проф. Н.Н. Попок);
- ♦ **плазменная эмиссионная электроника**  
(проф. В.А. Груздев, доц. В.Г. Залесский);
- ♦ **интенсификация процесса обработки сложных поверхностей деталей**  
(проф. В.А. Данилов, доц. Р.А. Киселев);
- ♦ **технологические комплексы**  
(проф. М.Л. Хейфец);
- ♦ **механика прочности деталей машин**  
(доц. В.Э. Завистовский);
- ♦ **механика жидкостей и газов**  
(проф. В.И. Коробко, проф. В.Н. Коровкин);
- ♦ **организация ремонтного производства**  
(проф. В.П. Иванов);
- ♦ **горное машиностроение**  
(чл.-кор. НАН Беларуси В.Я. Прушак).

Техническая наука в университете начиналась с образования технических кафедр и развивалась вместе с ними. Первый заведующий кафедрой технических дисциплин *Ю.П. Ощепков* (1969 г.) занимался металловедением и создал направление, связанное с изучением структур и свойств металлов и их совершенствованием. Впоследствии – это 30-летний опыт сотрудничества с предприятиями нефтехимической отрасли в области восстановления и упрочнения деталей машин.

Этой же проблемой занимался *Н.В. Спиридонов*, создавший первую в Республики Беларусь отраслевую лабораторию, имеющую союзное подчинение.

Одним из первых преподавателей Полоцкого университета (НИИ – филиала БПИ) *Г.М. Макаренко* на Полоцком авторемонтном заводе была создана лаборатория по плазменной обработке. Первые студенты-машиностроители, в том числе *В.Э. Завистовский* и *Н.Н. Попок*, получили навыки научной работы именно у *Ю.П. Ощепкова* и *Г.М. Макаренко*.

В направлении упрочняющих технологий работали *В.В. Кузнецов* (1970 г.) и *С.В. Ярмолович*, защитив затем кандидатские диссертации в Институте проблем надежности и долговечности машин. С 1984 по 2010 год *С.В. Ярмолович* возглавлял кафедру начертательной геометрии и графики.

Получив распределение в филиал БПИ (Новополоцк), *Ф.И. Пантелеенко* (1972 г.) под руководством проф. Л.Г. Ворошнина (БПИ – ныне БНТУ) защитил кандидатскую, а затем докторскую диссертации в области создания самофлюсующихся материалов на железной основе и защитных покрытий из них. Научная школа чл.-кор. НАН Беларуси *Ф.И. Пантелеенко* взрастила целую плеяду ученых, работающих в этом направлении: д-р техн. наук *В.М. Константинов*; канд. техн. наук *А.Л. Лисовский*; канд. техн. наук *А.С. Снарский*; канд. техн. наук *О.П. Штемпель*; канд. техн. наук *В.А. Фруцкий*; канд. техн. наук *С.Н. Жабурёнок* и другие. Научные работы *Ф.И. Пантелеенко* нашли практическое воплощение, в том числе и в диагностике нефтяных трубопроводов и емкостей.

В это же время с кафедры Л.Г. Ворошнина (БПИ – БНТУ) в Новополоцк прибывает канд. техн. наук *А.М. Долгих*, специализирующийся в области инструментальных сталей и впоследствии развивающий направление химико-термической обработки материалов.

Прибывшие в НПИ из Калининграда *Б.П. Чемисов*, *В.И. Абрамов*, *И.Т. Сычев* сформировали научное направление электроферромагнитного упрочнения деталей, которое координировал академик НАН Беларуси *Е.Г. Коновалов*, работавший в физико-техническом институте НАН Беларуси. По этому направлению были защищены кандидатские диссертации *Б.П. Чемисовым* и *В.И. Абрамовым*, выполнены первые дипломные проекты *В.Э. Завистовским* и *Н.Н. Попок*. Студенческую лабораторию по электрогидравлическому упрочнению деталей возглавлял *В.К. Липский*, также прибывший из Калининграда. Под его руководством по этой тематике был выполнен и защищен дипломный проект *Б. Сосновиком*.

Сегодня *В.К. Липский* – профессор, д-р техн. наук. Он способствовал становлению как ученого выпускника машиностроительного факультета *Ю.Г. Грозберга*, ныне декана радиотехнического факультета, и многих других.

Научное направление в области упрочнения и восстановления деталей машин нашло свое продолжение в тесном сотрудничестве с Институтом надежности и долговечности машин (ГНУ «Объединенный институт машиностроения») НАН Беларуси, благодаря которому защитили диссертации выпускники НПИ: *В.Э. Завистовский* и *С.Э. Завистовский*, *А.А. Лысов*, *А.С. Аршиков*, *А.В. Дудан*, *М.Л. Кипервассер*, *Н.Н. Петюшев*, *В.М. Изютко*, *А.В. Федоравичус*, *А.Л. Худолей* и др. Координировал это направление чл.-кор. НАН Беларуси *Н.Н. Дорожкин*.

Выпускник НПИ (1976 г.) *В.Я. Прушак*, начинавший заниматься наукой в сфере технологии машиностроения, защитил кандидатскую и докторскую диссертации и был избран членом-корреспондентом НАН Беларуси в области исследования и разработки геотехнологий и горной техники.

Наряду с металловедением, упрочняюще-восстанавливающим и технологическим направлениями в институте развивалось научное направление, связанное с обработкой материалов резанием. Его инициировал *Ю.А. Новоселов*, прибывший из г. Куйбышева (Самара), аспирант известного ученого, профессора, позднее ректора Тольяттинского политехнического института *А.Н. Резникова*. *Ю.А. Новоселов* развивает исследования в области тепловых явлений при резании, в частности при фрезеровании.

Исследовались новые способы обработки и инструменты – фрезоточение, сборные резцы и т.д., упорядочивалась терминология резания. В 1983 году в тесном сотрудничестве с известным ученым, профессором *Г.И. Грановским* (МГТУ им. Н.Э. Баумана), университетом Дружбы народов им. Патриса Лумумбы и Госстандартом СССР были выпущены три ГОСТа СССР, которые и сегодня определяют терминологию науки о резании материалов.

Кандидатскую диссертацию по ротационному подрезанию торцов труб защитил *В.А. Петров*, аспирант школы *А.Н. Резникова*, прибывший из г. Владимира. *В.А. Петров* – специалист поистине энциклопедических знаний, много сделал для становления кафедр технологии машиностроения и металло-reжующих станков Полоцкого университета.

Формированию направления ротационного резания способствовал *Е.М. Найдёнышев*, прибывший из ФТИ НАН Беларуси (диссертация по ротационному растачиванию). Впоследствии по этому направлению выпускники НПИ (ПГУ) *Н.Н. Попок* и *М.Л. Хейфец* защитили кандидатские диссертации.

Научное направление в области резания материала развивали *В.А. Данилов* и *А.И. Голембиевский*, прибывшие из Калининграда. На тот момент *В.А. Данилов* уже состоялся как ученый в области контроля сложнопрофильных поверхностей деталей. Впоследствии он занимался ротационным резанием, обработкой некруглых валов, шлицевых и зубчатых контуров и создал научную школу по интенсификации процесса резания сложных поверхностей. *А.И. Голембиевский* защитил диссертацию по поверхностному пластическому деформированию деталей в ФТИ НАН Беларуси, занимался тангенциальным резанием и исследовал эффект затирания при зубодолблении, развивает системологию зубонарезания.

Прибывший из Томска (1993 г.) доктор технических наук, профессор *В.А. Груздев* сформировал научный коллектив и создал научную школу по направлению обработки материалов плазменно-эмиссионными электронами, которая успешно развивается в тесном содружестве с ФТИ НАН Беларуси и кафедрами машино-

строительного факультета. По его инициативе организован Совет по защите диссертаций К 02.19.02 «Электрофизика и электрофизические установки». Успешно защитили кандидатские диссертации *В.Г. Залесский, Ю.П. Голубев, О.П. Петрович, Д.А. Антонович* и др. Впоследствии *В.Г. Залесский* защитил докторскую диссертацию и ныне возглавляет ФТИ НАН Беларуси.

Необходимо отметить научно-исследовательские работы по алмазной обработке материалов (науч. руководители *А.А. Лысов, А.С. Аришков*) и абразивной обработке ленточным инструментом (науч. руководитель *С.Э. Завистовский*).

Под влиянием научных школ машиностроительного факультета и Совета по защите диссертаций, возглавляемого *Ф.И. Пантелеенко*, развивались научные взгляды многих производственников, среди которых директор ОАО «Проммашремонт», канд. техн. наук *В.И. Семёнов*, директор ОАО «Белкард» (Гродно), канд. техн. наук *В.И. Кравченко* и другие.

Сочетание технологических и физических направлений исследований позволило сформировать научные направления по мобильному производству, основанному на модульных технологиях, быстроперестраиваемых оборудовании и инструментах (науч. руководитель *Н.Н. Попок*), а также проектированию технологических комплексов (науч. руководитель *М.Л. Хейфец*). Способствовал развитию этих направлений и координировал их академик НАН Беларуси *П.И. Яцерицын*.

Уникальность **научной школы по мобильному развитию машиностроительного производства** состоит в том, что она формировалась на базе разных научных школ-представителей различных городов Советского Союза и впитала в себя лучшие их достижения. Наиболее существенный вклад в создание школы внес академик НАН Беларуси *П.И. Яцерицын* – известный ученый в машиностроении и обработке металлов резанием. За время деятельности школы защищено 4 кандидатских и 3 докторских диссертации, более 30 магистерских.

Научная школа сегодня активно развивается, о чем свидетельствуют выполняемые задания в государственных программах научных исследований, в том числе фундаментальных, которые завершены внедрением разработок в производства ряда станкостроительных и инструментальных предприятий Витебской области; участвует в выполнении заданий Государственной программы инновационного развития Республики Беларусь на 2016–2020 годы по созданию и развитию технопарка Полоцкого государственного университета, в международных проектах с Литовским инновационным центром.

Изданы многочисленные монографии и статьи в рецензируемых журналах, получены патенты на изобретения. Регулярно с интервалом в два года проводятся международные научно-технические конференции «Инновационные технологии в машиностроении» с участием ученых России, Украины, Литвы, Латвии, Польши, Германии.

Постоянно совершенствуется материально-техническая база исследований. За последние годы приобретены современные металлорежущие станки с ЧПУ и вакуумная установка для ионно-плазменной обработки изделий, современная измерительная аппаратура и приборы для измерения температуры, шероховатости поверхности и т.д.

Главное достижение научной школы – преемственность ее учеников и последователей. Студенты занимаются научной работой, участвуют в выполнении госбюджетной тематики, выступают с докладами на студенческих конференциях. По научно-исследовательским темам выполняются дипломные проекты.

По результатам Республиканского конкурса научных работ в 2017 году лауреатом стал магистрант, а ныне аспирант *В.С. Анисимов*. Открыта практикоориентированная магистратура «Инновационные технологии в машиностроении». Еще большую привлекательность для молодых ученых школе придает открытие в этом году перспективной специальности «Производство изделий на основе трехмерных технологий». Обучение студентов и освоение ими цифровых технологий позволят увеличить количество молодых людей, желающих заниматься наукой.

Сегодня основные направления научных исследований факультета динамично развиваются и проводятся в рамках следующих **научных школ**:

♦ **научная школа по мобильному развитию машиностроительного производства** (науч. руководитель *Н.Н. Попок*, д-р техн. наук, проф.):

- систематизация машиностроительных изделий и их поверхностей по конструктивным, технологическим и функциональным признакам;
- обоснование обобщенных показателей степени сложности изделий и мобильности производства;
- моделирование технологической системы, в комплексе учитывающей организационные, технологические и физические характеристики производства;
- исследование кинематико-геометрических и физических характеристик процесса резания и ионно-лучевой обработки труднообрабатываемых материалов;
- разработка автоматизированной системы проектирования многофункциональной модульной технологической оснастки.

♦ **научная школа в области технической эксплуатации и реновации машин** (научный руководитель *В.П. Иванов*, д-р техн. наук, проф.).

Основоположителем научной школы является заведующий кафедрой механики Полоцкого государственного университета (до 1998 г.), доктор физ.-мат. наук, проф. *В.И. Коробко*. В Новополоцком политехническом институте он открыл научную специальность 05.20.03 – *восстановление, эксплуатация и ремонт сельскохозяйственной техники и развил научные основы очистки машин во время их ремонта*. Это направление было успешно реализовано в кандидатских диссертациях *Д.П. Гегерса*, *Л.М. Спириденко*, *С.К. Бабаджанова* и *В.И. Семенова*. Под руководством профессора *В.И. Коробко* были защищены кандидатская и докторская работы *В.П. Ивановым* в направлении создания научных основ технологической подготовки ремонтного производства.

Развитие научного направления связано с производственной и научной деятельностью *В.П. Иванова*, *В.И. Семенова*, *А.П. Кастрюка* и *А.В. Крыленко* по ремонту и диагностированию машин, что способствовало образованию кафедры автомобильного транспорта и подготовке специалистов в области технической эксплуатации автомобилей и автосервиса с 2008 года.

Ученые-машиностроители Полоцкого государственного университета всегда были на острие науки и инноваций, сформировав и выполняя РНТП «Инновационное развитие Витебской области», участвуя в ГПНИ, создавая субъекты инновационной инфоструктуры.

Представляется, что сегодня Полоцкий университет в свете современных реалий вполне соответствует концепции «Университет 3,0», развивая Центр трансфера технологий и научно-технический парк, которые способствуют коммерциализации образовательных и научных разработок и услуг.

В свою очередь, инновационная деятельность создаёт условия для подготовки современных кадров. В 2017 году открыта новая специальность I ступени образования 1-36 07 02 «Производство изделий на основе трехмерных технологий», практико-ориентированная магистратура 1-36 81 01 «Инновационные технологии в машиностроении», будущие инженеры получают рабочие профессии – операторов станков с ЧПУ. Активное участие молодежи в научной и практической деятельности – залог продолжения исторических традиций и развития университета в будущем.

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

## СОДЕРЖАНИЕ

### МАШИНОВЕДЕНИЕ И МАШИНОСТРОЕНИЕ

<i>Голембиевский А.И.</i> Эволюция развития кинематической структуры металлорежущих станков для зуботочения обкатным резцом типа долбяка.....	2
<i>Пилипенко С.В., Дудан А.В.</i> Развитие метода расчета тепловыделений от пластической деформации при холодной пильгерной прокатке труб .....	13
<i>Пантелеенко Ф.И., Шумов О.В.</i> Уменьшение деформаций сварных соединений .....	18
<i>Капский Д.В., Пегин П.А., Головнич А.К., Иванов В.П.</i> Аудит дорожного движения – инструмент повышения безопасности движения.....	22
<i>Вигерина Т.В., Фруцкий В.А., Кострицкий В.В.</i> Восстановление вкладышей коленчатого вала .....	34
<i>Асламов Ю.П., Асламов А.П., Давыдов И.Г., Цурко А.В.</i> Вейвлет-функции для диагностики зубчатых передач .....	38
<i>Довгалев А.М., Тарадейко И.А., Леванович Н.А.</i> Прогрессивные конструкции инструментов для совмещенного магнитно-динамического накатывания цилиндрических поверхностей .....	47
<i>Попок Н.Н., Хмельницкий Р.С., Анисимов В.С.</i> Технологическое обеспечение обработки неполных сферических поверхностей деталей машин .....	54
<i>Долгих А.М., Станкевич Н.А.</i> Повышение эксплуатационной стойкости деталей нитепроводной гарнитуры размоточных и тростильно-крутильных машин методом химико-термической обработки.....	61
<i>Пантелеенко Ф.И., Шумов О.В.</i> Повышение стойкости сварных соединений алюминиевых сплавов .....	69
<i>Максимов С.А., Сункуев Б.С.</i> Влияние режимов обработки пластин из поливинилхлоридного пластика пробойником на качество обработанной поверхности.....	73
<i>Гребенчук П.С., Боровский Д.Н.</i> Тонкое измельчение стеклобоя в мельницах различных конструкций.....	79
<i>Вайтехович П.Е.</i> Ударно-абразивное изнашивание лопастей ротора центробежной мельницы .....	84
<i>Кириенко А.С.</i> Ленточный шлифовальный инструмент с ориентированным рельефом абразивосодержащего поверхностного слоя .....	90

### ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

<i>Вершинин Н.К., Любимов Д.Н., Дунаев А.В., Пустовой И.Ф., Рыжов В.Г., Шалимов В.Э.</i> Электрическое воздействие на масла – инновация в триботехнике.....	96
<i>Митинов А.В., Сафронова Е.В.</i> Получение защитного воска для резин из побочных продуктов процесса депарафинизации масел .....	103
<i>Зильбергейт М.А., Якубовский С.Ф.</i> Кинетика делигнификации древесины ели в условиях инактивации лигнина .....	108
<i>Ковалёва И.В., Булавка Ю.А., Москаленко А.С.</i> Изучение влияния низкомолекулярного полиэтилена на свойства остатка висбрекинга в процессе его окисления.....	112
<i>Митинов А.В., Сафронова Е.В.</i> Модернизация градирен нефтеперерабатывающих заводов .....	116

### ИНФОРМАЦИЯ

<i>Попок Н.Н.</i> Научные школы НИИ – ПГУ в машиностроении: создание и развитие .....	120
---	-----