

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ**

Учреждение образования  
**«Брестский государственный технический университет»**

**НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И МАТЕРИАЛЫ,  
АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА**

**Сборник статей  
международной научно-технической конференции**

**(Брест, 16–17 ноября 2023 года)**

**Брест 2023**

УДК 681.5; 539.3; 658.51; 621  
Н72

***Рецензенты:***

академик НАН Беларуси, доктор технических наук, профессор  
*Марукович Е. И.*;

директор ГНУ «Институт технической акустики» НАН Беларуси, доктор  
технических наук, доцент *Рубаник В. В.*

***Редакционная коллегия:***

*Онысько С.Р.* – декан машиностроительного факультета Брестского государственного технического университета, к.т.н., доцент

*Прокопеня О.Н.* – заведующий кафедрой автоматизации технологических процессов и производств Брестского государственного технического университета, к.т.н., доцент

*Голуб В.М.* – заведующий кафедрой машиноведения Брестского государственного технического университета, к.т.н., доцент

*Монтик С.В.* – заведующий кафедрой машиностроения и эксплуатации автомобилей Брестского государственного технического университета, к.т.н., доцент

*Парфиевич А.Н.* – заведующий кафедрой прикладной механики Брестского государственного технического университета, к.т.н.

**Н72 Новые технологии и материалы, автоматизация производства:** сборник статей / Брестский государственный технический университет. – Брест : Издательство БрГТУ, 2023. – 210 с.

**ISBN 978-985-493-606-2.**

В сборнике статей конференции в обобщенном виде приведены результаты исследований в области диагностики и эксплуатации машин и станочного оборудования, конструирования, производства, автоматизации производственных процессов, современных технологий обработки материалов. Значительная часть материалов посвящена методам и результатам исследований физических процессов в материалах при их обработке.

Статьи представлены по тематике докладов Международной научно технической конференции «Новые технологии и материалы, автоматизация производства», 16–17 ноября 2023 г.

Сборник предназначен для специалистов, работающих в сфере машиностроения, управления технологическими процессами и автоматизации. Он также представляет интерес для научных сотрудников, аспирантов, магистрантов и студентов соответствующих специальностей.

УДК 681.5; 539.3; 658.51; 621

ISBN 978-985-493-606-2

© Издательство БрГТУ, 2023

**УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ,  
АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА,  
ПРОМЫШЛЕННАЯ РОБОТОТЕХНИКА**

## НАБЛЮДАТЕЛЬ СОСТОЯНИЯ В ПРИВОДЕ РОБОТА

Прокопеня О.Н.<sup>1</sup>, Терещук Г.В.<sup>1</sup>, Лапука А.С.<sup>1</sup>, Пикула А.И.<sup>1</sup>

1) Брестский государственный технический университет,  
г. Брест, Республика Беларусь

Приводы промышленных роботов на основе двигателей постоянного тока обычно делают многоконтурными с тем, чтобы обеспечить требуемое качество переходных процессов. В то же время, для данных приводов является актуальным снижение массо-габаритных показателей, что приводит к необходимости упрощать структуру привода [1,2]. Данная задача может быть успешно решена применением наблюдателя состояния, что позволяет построить привод с использованием только датчика положения [3-5].

Однако, вследствие того, что постоянные времени двигателя постоянного тока очень малы (сотые доли секунды), можно предположить, что при цифровой реализации наблюдателя потребуется очень малое время дискретизации (период квантования). Это в свою очередь, потребует высокого быстродействия вычислительного устройства, на котором реализуется наблюдатель. Таким образом, возникает задача определения требований по быстродействию к программируемому контроллеру при построении привода постоянного тока с наблюдателем состояния.

Данная работа посвящена решению указанной задачи. Для этого разработана математическая модель привода с цифровым наблюдателем состояния, которая реализована в приложении Simulink среды программирования MATLAB.

Уравнения, описывающие поведение привода

$$\dot{\alpha} = k_p \cdot \omega, \quad (1)$$

$$J_p \cdot \dot{\omega} = c_m \cdot I_{\text{я}}, \quad (2)$$

$$L_{\text{я}} \cdot \dot{I}_{\text{я}} + (R_{\text{я}} + R_{\text{дп}}) \cdot I_{\text{я}} + c_e \cdot \omega = k_y \cdot U_{\text{у}}, \quad (3)$$

где  $\alpha$  – угол поворота выходного звена;

$\omega$  – угловая скорость двигателя;

$I_{\text{я}}$  – ток якоря двигателя;

$J_p$  – момент инерции ротора;

$L_{\text{я}}$  – индуктивность обмотки якоря;

$R_{\text{я}}$  и  $R_{\text{дп}}$  – сопротивление обмотки якоря и обмотки дополнительных полюсов;

$k_p$  и  $k_y$  – коэффициенты передачи редуктора и силового преобразователя (усилителя);

$c_e$  и  $c_m$  – постоянные двигателя;

$U_{\text{у}}$  – управляющее напряжение (входное воздействие).

На основе уравнений (1-3) получены матрицы модели в переменных состояния

$$A = \begin{bmatrix} 0 & k_p & 0 \\ 0 & 0 & \frac{c_M}{J_p} \\ 0 & -\frac{c_e}{L_{\text{я}}} & -\frac{R_{\text{я}} + R_{\text{ДП}}}{L_{\text{я}}} \end{bmatrix}; B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{k_v}{L_{\text{я}}} \end{bmatrix}; C = [1 \ 0 \ 0]; D = [0]$$

С использованием данных матриц выполнен синтез привода методом размещения полюсов, т.е. найдена матрица коэффициентов усиления в цепях обратной связи  $K=[0.4379 \ -1.0173 \ -3.1176]$ . Для построения привода робота выбран двигатель 2ПБ112М мощностью  $P_H=0,45$  кВт.

На основании полученных значений коэффициентов построена математическая модель привода в приложении Simulink.

Переходная характеристика привода при данных значениях коэффициентов приведена на рисунке 1. Она является монотонной (перерегулирование отсутствует), что является обязательным требованием для приводов роботов. Время регулирования в данном случае существенного значения не имеет. При необходимости его требуемая величина может быть обеспечена соответствующим выбором значений полюсов при синтезе.

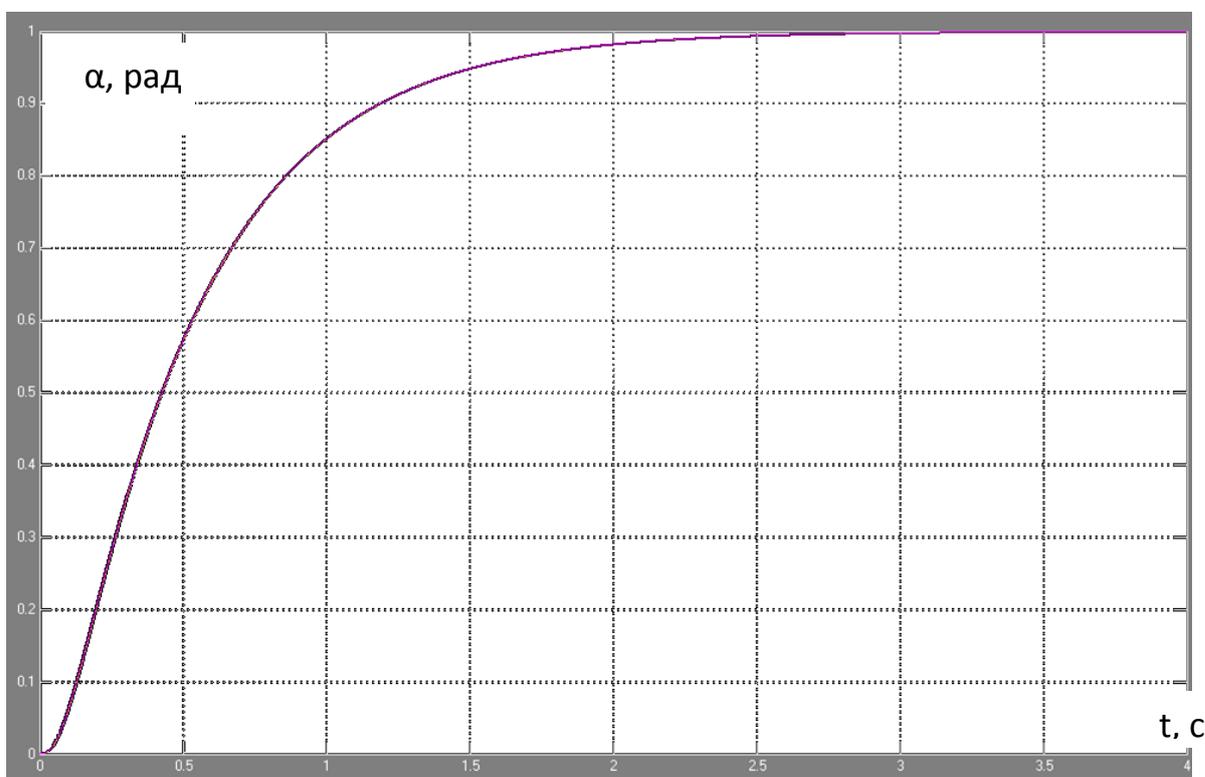


Рисунок 1 – Переходная характеристика привода

Далее была аналитически решена задача синтеза наблюдателя состояния для данного привода. В результате получены уравнения состояния наблюдателя

$$\underline{\dot{\alpha}} = -g_1 \bar{\alpha} + k_p \bar{\omega} + g_1 y; \quad (4)$$

$$\dot{\bar{\omega}} = -g_2 \bar{\alpha} + \frac{c_M}{J_P} \bar{I}_Я + g_2 y; \quad (5)$$

$$\dot{\bar{I}}_Я = -g_3 \bar{\alpha} - \frac{c_e}{L_Я} \bar{\omega} - \frac{R_Я + R_{ДП}}{L_Я} \bar{I}_Я + \frac{k_y}{L_Я} U_y + g_3 y, \quad (6)$$

где  $g_1, g_2, g_3$  – элементы матрицы  $G$  наблюдателя;

$\bar{\alpha}, \bar{\omega}, \bar{I}_Я$  – вычисляемые наблюдателем состояния значения угла поворота, угловой скорости и тока двигателя;

$y$  – выходная переменная привода (в нашем случае – угол поворота  $\alpha$ ).

При расчете матрицы  $G$  значения полюсов наблюдателя состояния приняты на порядок больше, чем для системы без наблюдателя. Полученная с помощью математической модели переходная характеристика привода с наблюдателем состояния по визуальной оценке не отличается от переходной характеристики привода без наблюдателя (см. рисунок 1), т.е. условно аналоговый наблюдатель (при очень маленьком периоде квантования) не влияет заметно на качество регулирования.

С целью оценки такого влияния при заданном периоде квантования была разработана математическая модель дискретного наблюдателя состояния.

На основе дифференциальных уравнений (4-6) получены конечно-разностные уравнения наблюдателя состояния

$$\alpha(k+1) = (1 - g_1 T) \alpha(k) + k_p T \omega(k) + g_1 T y(k), \quad (7)$$

$$\omega(k+1) = \omega(k) - g_2 T \alpha(k) + \frac{c_M}{J_P} T I_Я(k) + g_2 T y(k), \quad (8)$$

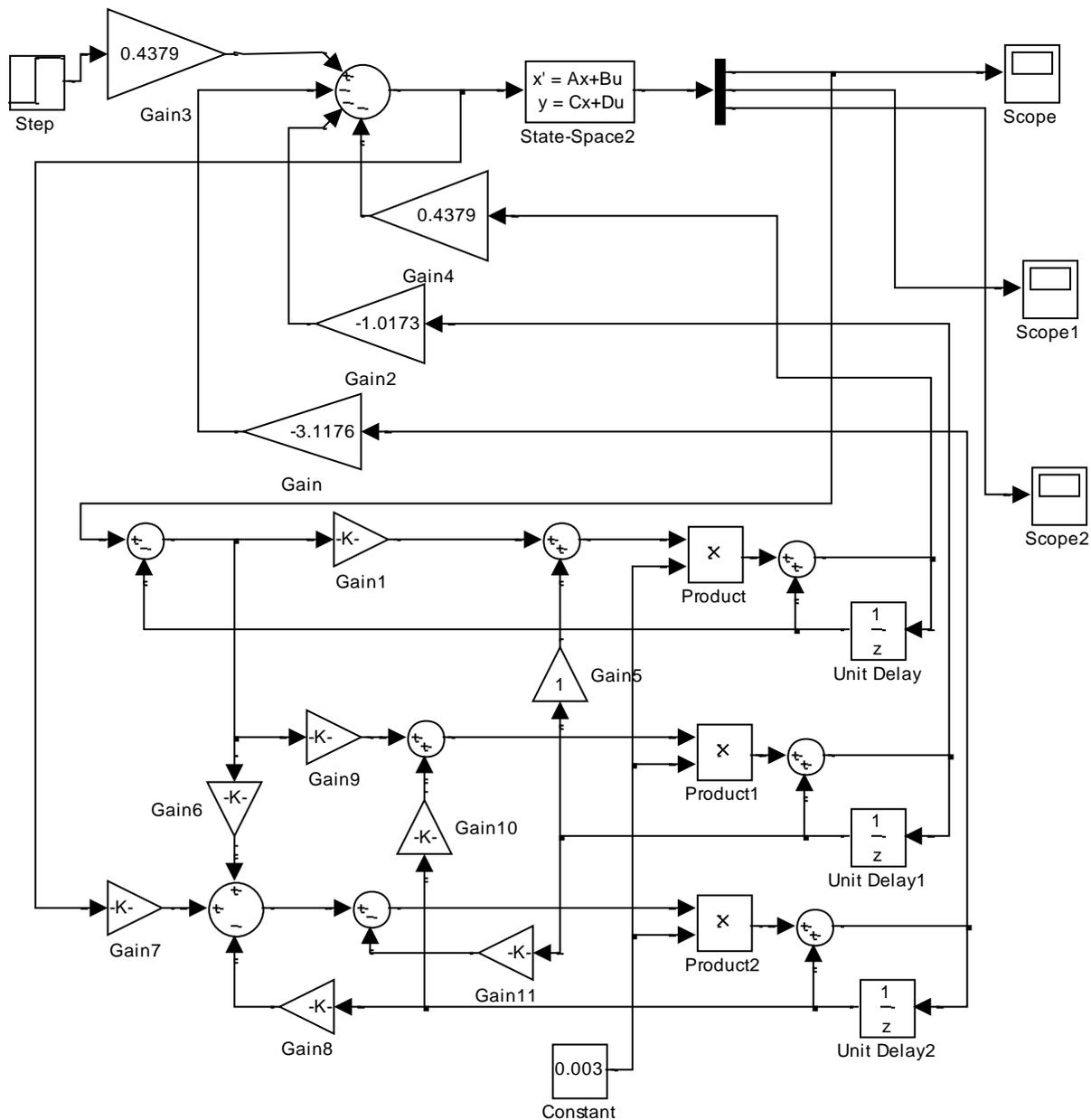
$$I_Я(k+1) = I_Я(k) - g_3 T \alpha(k) - \frac{c_e}{L_Я} T \omega(k) - \frac{R_Я + R_{ДП}}{L_Я} T I_Я(k) + \frac{k_y}{L_Я} T U_y(k) + g_3 T y(k), \quad (9)$$

где  $T$  – период квантования.

Данные уравнения представлены в рекуррентной форме, что позволяет реализовать процесс вычисления переменных состояния цифровым устройством, а также построить модель данного устройства в приложении Simulink.

На рисунке 2 показана математическая модель привода с цифровым наблюдателем состояния, включенным в контур регулирования. В данной мо-

дели период квантования  $T$  можно задавать принудительно, что позволяет выявить его влияние на точность работы наблюдателя состояния и переходную характеристику привода.

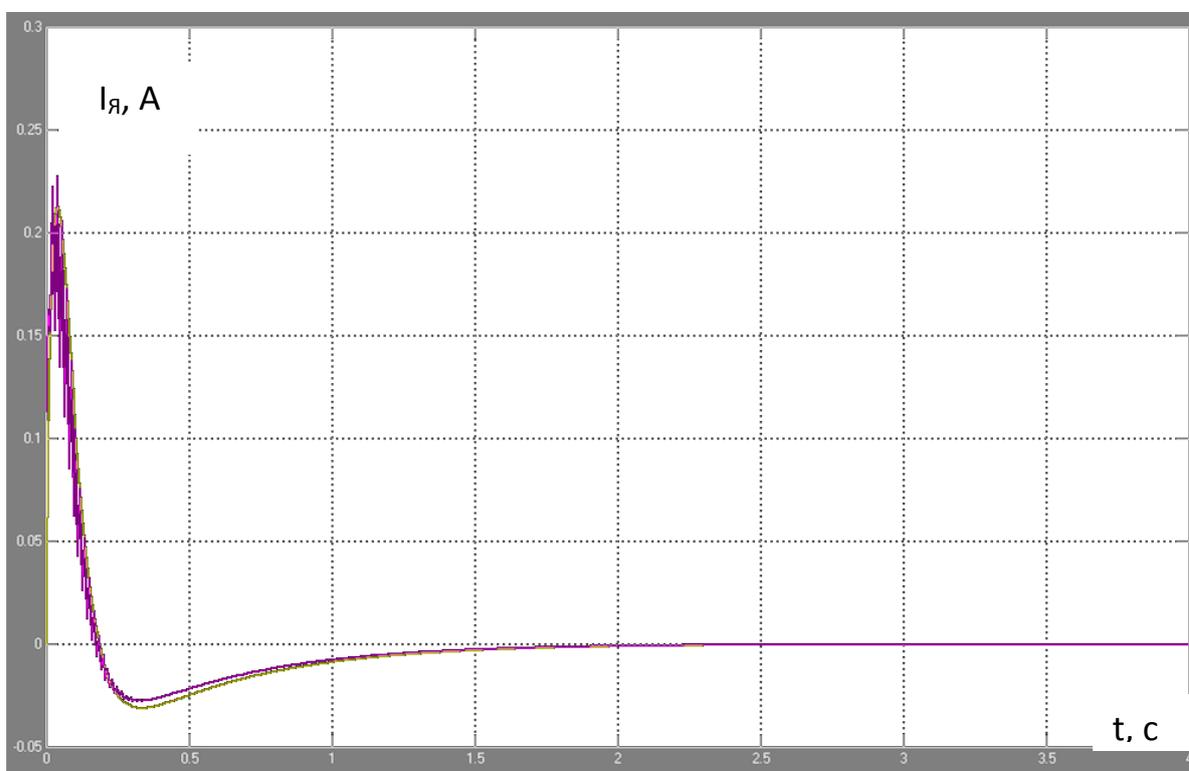


**Рисунок 2 – Математическая модель привода с цифровым наблюдателем состояния в приложении SIMULINK.**

С помощью данной математической модели было исследовано влияние периода квантования на переходную характеристику привода. Первоначально выполнена оценка точности работы цифрового наблюдателя состояния при изменении периода квантования. При этом в контур регулирования был включен аналоговый наблюдатель состояния, а цифровой наблюдатель вычислял переменные состояния, которые выводились на осциллографы совместно с реальными переменными состояния.

При увеличении периода квантования до значения  $T=0,008$  с визуально стало заметным расхождение между кривыми изменения тока двигателя с выхода объекта и цифрового наблюдателя состояния, как показано на рисунке 3. На сигнале с выхода наблюдателя состояния появилась колебательная составляющая, как результат погрешности вычисления. Расхождений по кривым изменения угла поворота и угловой скорости при данном значении периода квантования не наблюдалось.

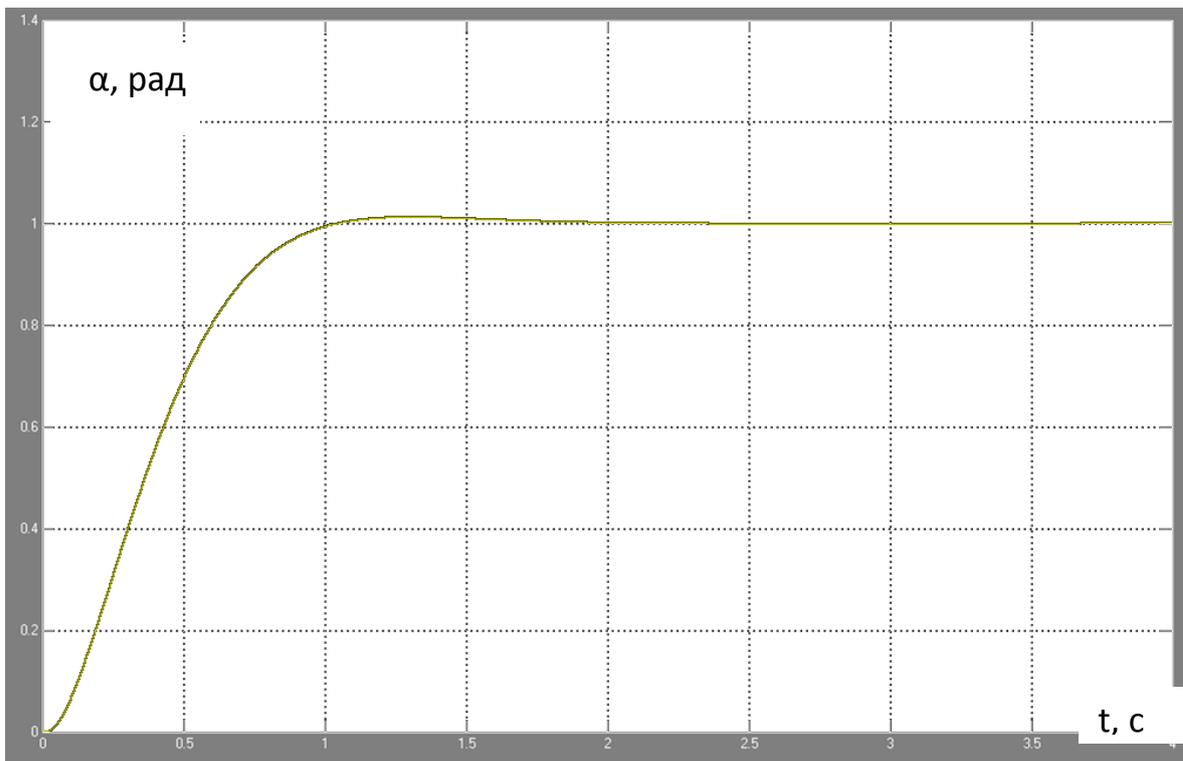
При дальнейшем увеличении периода квантования возникла ошибка вычисления по всем переменным состояниям с появлением значительных колебательных составляющих вплоть до потери устойчивости наблюдателя при  $T=0,009$  с. Таким образом, нарушение нормальной работы цифрового наблюдателя состояния при достижении периодом квантования некоторого значения происходит весьма быстро при его дальнейшем росте (по визуальной оценке).



**Рисунок 3 – Изменение тока двигателя при  $T=0,008$  с**

Далее было исследовано влияние погрешности вычисления переменных состояния наблюдателем на работу привода с помощью математической модели, в которой цифровой наблюдатель состояния включен в контур регулирования (см. рисунок 2).

Установлено, что влияние погрешности работы цифрового наблюдателя на переходную характеристику привода начинает проявляться раньше, чем данную погрешность можно обнаружить визуально. Так, уже при  $T=0,002$  с появляется перерегулирование по углу поворота около 1% (см. рисунок 4), а при  $T=0,003$  с процесс становится настолько колебательным, что привод можно считать неработоспособным.



**Рисунок 4 – Переходная характеристика привода при  $T=0,002$  с.**

Следовательно, даже небольшая погрешность работы наблюдателя состояния может оказывать существенное влияние на качество работы привода, что предъявляет весьма высокие требования к точности работы наблюдателя. В рассматриваемом приводе это требование может быть надежно обеспечено лишь при периоде квантования порядка 1 мс. Необходимо также оценить, как полученные результаты зависят от быстродействия наблюдателя состояния, определяемого значением полюсов.

Как указывалось ранее, при расчете наблюдателя состояния его полюсы были приняты по модулю в десять раз больше полюсов системы. При уменьшении модуля полюсов в 2,5 раза (полюсы наблюдателя в 4 раза больше полюсов системы) значение периода квантования, при котором наблюдатель теряет устойчивость, несколько возросло, но влияние на переходную характеристику стало проявляться еще в большей степени. Так при  $T=0,002$  с перерегулирование увеличилось до значения примерно 5%. Из этого следует, что повышение устойчивости наблюдателя компенсируется негативным влиянием снижения его быстродействия вследствие увеличения модуля полюсов, что в конечном итоге делает нецелесообразным такое увеличение.

Таким образом, можно рекомендовать при проектировании наблюдателя состояния принимать его быстродействие по возможности высоким за счет соответствующего выбора полюсов, а допустимое значение периода квантования определять на основе моделирования работы привода с помощью предложенной математической модели в каждом конкретном случае.

Полученным при этом значением периода квантования следует руководствоваться при выборе вычислительного устройства (контроллера) для реализации наблюдателя. Цикл работы контроллера с учетом программы вычисления не должен превышать допустимого значения периода квантования.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Прокопеня, О.Н. Особенности синтеза приводов роботов методом размещения полюсов / О. Н. Прокопеня, А. В. Власовец, А. Г. Олех // Вестник БрГТУ. – 2015. – № 4 : Машиностроение. – С. 30–33.

2. Прокопеня, О.Н. Минимизация структуры приводов роботов при синтезе методом размещения полюсов / О. Н. Прокопеня, А. А. Власовец, А. Г. Олех // Инновационные технологии, автоматизация и мехатроника в машино- и приборостроении : материалы IV международной научно-практической конференции, Минск, 3 – 4 февраля 2016 г. / БНТУ – Минск : Бизнесофсет, 2016. – С. 140–141.

3. Дорф, Р. Современные системы управления / Р. Дорф, Р. Бишоп. Пер. с англ. Б.И. Копылова. – М.: Лаборатория базовых знаний, 2002. – 832 с.

4. Методы классической и современной теории автоматического управления: Учебник в 5-и тт.; 2-е изд. перераб. и доп. Т. 4: теория оптимизации систем автоматического управления / Под ред. П.А. Пупкова, Н.Д. Егупова. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 744 с.

5. Филлипс, Ч. Системы управления с обратной связью / Ч. Филлипс, Р. Харбор. – М.: Лаборатория базовых знаний, 2001. – 616 с.

УДК 621.5

## АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ МАШИНОЙ ДЛЯ ОТЖИМА ВОДЫ ИЗ ИЛА

**М.Д. Тарасевич, Е.В. Василюк**

*Брестский государственный технический университет, г.Брест,  
Республика Беларусь*

Анализ предприятий мусороперерабатывающей отрасли показывает, что в большинстве из них используются устаревшие методы отработки иловых отложений. Также на многих таких предприятиях соответствующее оборудование сильно изношено и не позволяет в должной степени и с удовлетворительным качеством обрабатывать большие объемы ила. Отсюда цели и задачи состоят в разработке высокоэффективного способа отделения воды из ила.

Важным этапом при очистке сточных вод является механическое обезвоживание осадка. На данный момент существует несколько технологий обезвоживания — с помощью камерных фильтр-прессов, с помощью дисковых шнековых дегидраторов, с помощью ленточных прессов и с помощью центрифуг (декантеров). Каждая технология имеет свои плюсы и минусы (занимаемая площадь, энергопотребление, стоимость и т. п.). При обезвоживании обычно

используют реагент (флокулянт) для увеличения эффективности обезвоживания. В настоящее время широкое применение получает использование центрифуг для обезвоживания. Качество разделения жидкой и твердой фракции самое высокое из вышеупомянутых технологий[1].

Цель управления сушки заключается в обеспечении высушивания поступающего влажного твердого материала до заданного влагосодержания при определенной производительности установки по влажному материалу.

Основным возмущением процесса является изменение расхода, начальной влажности и дисперсного состава частиц твердого материала, а также изменение расхода и начальной температуры сушильного агента – теплоносителя.

Основная регулируемая величина процесса – это остаточная влажность твердого материала.

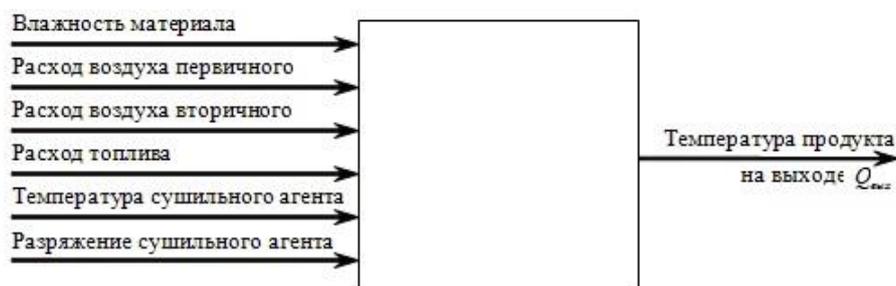


Рисунок 1 - Структурная схема процесса сушки

Вследствие отсутствия надежных измерительных преобразователей остаточной влажности твердого материала при автоматизации процесса в качестве регулируемых величин используют температуру или влажность сушильного агента[2-3]. В САУ машиной для отжима воды из ила в качестве регулируемой величины будем использовать температуру (рисунок 1).

#### Описание технологического процесса.

В сушильный блок (рисунок 2) подается сырье (кек). В сушильном блоке сырье высушивается до влажности 10-12%.

Сушильный блок состоит из трех секций 1, 2 и 3. Каждая секция состоит из корпуса с паровой рубашкой 6 и подогреваемого шнека 5. Секции установлены на раме 4, имеют патрубки для загрузки сырья 7 и выгрузки продукта 8, коллектор подвода пара 11 и отвода конденсата 12. Привод состоит из электродвигателя 13 соединенного с редуктором 14 клиноременной передачей 15. Редуктор через цепь 16 передает вращение шнекам 5. Натяжение цепи 16 регулируется устройством 18 при помощи груза 17. Цепная передача закрыта кожухом 19. После монтажа паровые рубашки секций и паропроводы теплоизолируются.

#### Принцип работы:

Агрегат работает следующим образом: в работающий сушильный блок равномерно подают сырье через патрубок 7. Сырье транспортируется вдоль корпуса 6 шнеком 5. Во время транспортировки вдоль секции сырье нагревается в тонком слое между корпусом 6 и шнеком 5 и одновременно перемешивается, в результате чего происходит интенсивное испарение влаги из сырья. Соковые пары, образующиеся при сушке, удаляются вытяжной вентиляцией через вытяжной коллектор 10. Сырье последовательно проходит по трем секциям 1, 2 и 3 и выгружается из патрубка 8.

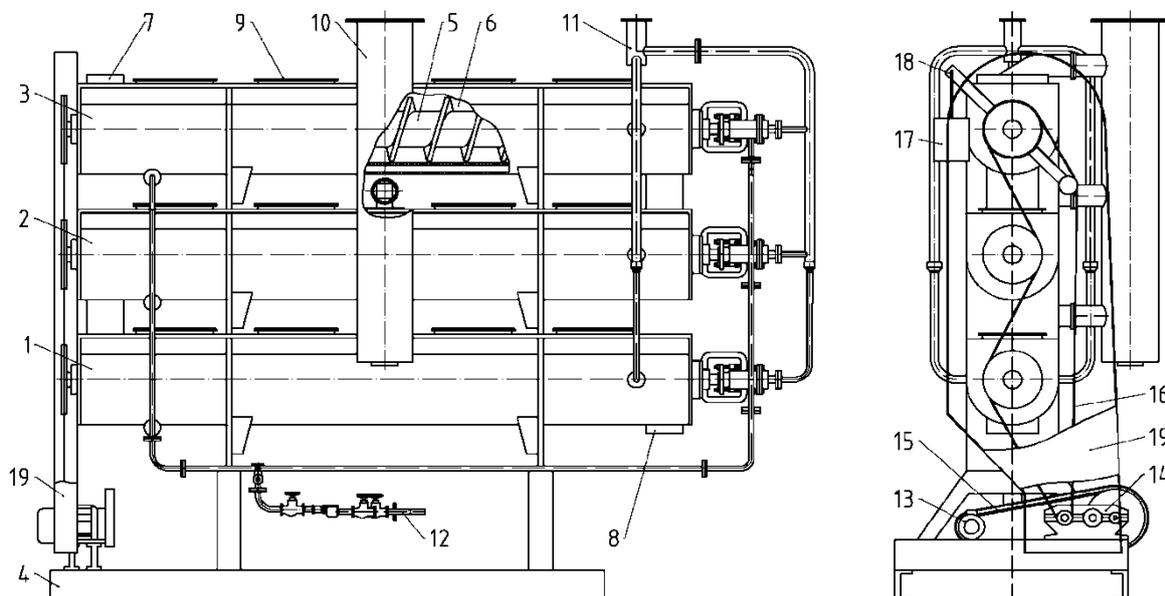
### Технические характеристики:

Габаритные размеры: 4140x1240x2975 мм.

Масса: 3000 кг

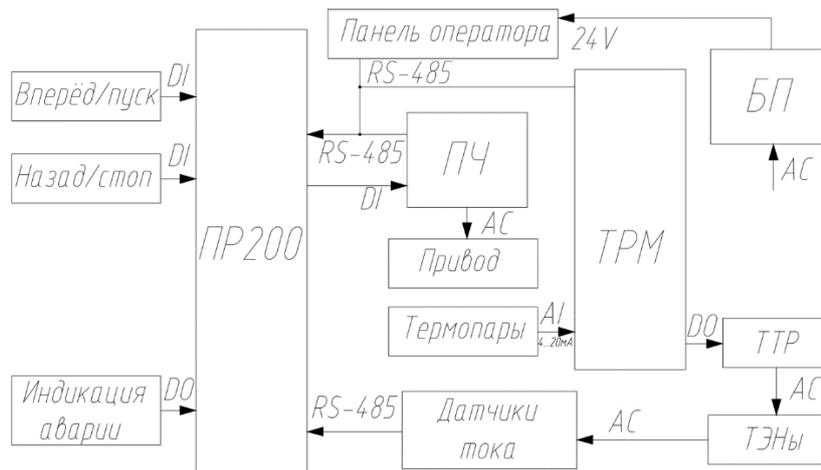
Производительность: 1 т/ч

Мощность электродвигателя: 7,5 кВт



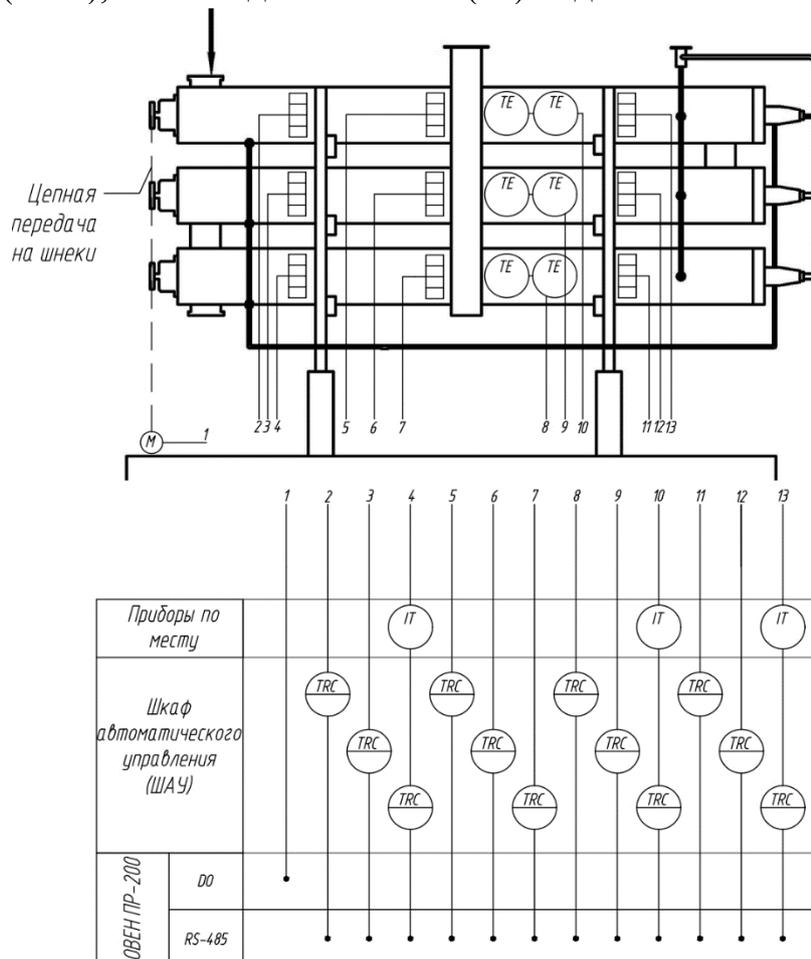
**Рисунок 2 - Блок сушильный:** 1, 2, 3 – сушильные секции, 4 – рама, 5 – шнек, 6 – корпус, 7 – патрубок загрузки, 8 – патрубок выгрузки, 9 – смотровой люк, 10 – вытяжной коллектор, 11 – коллектор паропровода, 12 – коллектор конденсатный, 13 – электродвигатель, 14 – редуктор, 15 – клиноременная передача, 16 – цепь, 17 – груз, 18 – устройство натяжения цепи, 19 – защитный кожух

**Структурная схема системы автоматизации.** Рассмотрим структурную схему САУ (рисунок 3). В данной схеме показано, что питание частотного преобразователя трёхфазное переменное напряжение 380В, а питание блока питания, регулятора температуры ТРМ и программируемого реле ПР200 - однофазное переменное напряжение 220В. Блок питания служит для питания панели оператора (постоянное напряжение 24В) и кнопок. На ПР200 приходят сигналы от кнопок вперед/пуск и назад/стоп. В случае аварии загорается лампа “Авария”, которая подключена к ПР200. Также ПР200 подаёт сигналы с кнопок на дискретные входы ПЧ. К ПЧ подключен привод (питание трёхфазное переменное напряжение). К аналоговым входам ТРМ подключены термопары с унифицированным сигналом 4...20мА для установления необходимой температуры в трубах сушильного блока. К дискретным выходам ТРМ подключены твердотельные реле для коммутации больших токов (30А), к которым подключены нагреватели. Обратная связь нагревателей осуществляется при помощи датчиков тока (трансформаторы тока + 3-х канальный амперметр), которые по RS-485 подключены к ПР200. “Master”-устройством в данной САУ является ПР200, а “Slave”-устройствами являются ПЧ, панель оператора, ТРМ и датчики тока (подключенные по RS-485). Панель оператора служит для задания температуры нагрева и времени.



**Рисунок 3 - Структурная схема системы автоматизации**

**Функциональная схема САУ.** Функциональная схема САУ представлена на рисунке 4. В данной схеме показано, что вращение шнеков осуществляется за счёт мотор-редуктора М1 и цепной передачи. На трубах установлены нагреватели, которые подключены к датчикам тока (IT) по месту и к твердотельным реле (TRC) в шкафу автоматического управления. Также в трубах установлены термопары (TE), которые подключены к регулятору температуры ТРМ. Сигналы на привод поступают с дискретных выходов ПР200 через ПЧ. ТРМ, твердотельные реле (TRC), а также датчики тока (IT) подключены по RS-485 к ПР200.



**Рисунок 4—Функциональная схема САУ**

Таким образом, предложенная система автоматизации имеет большие перспективы, так как она даёт возможность осуществлять процесс отжима воды из ила на мусороперерабатывающих производствах в автоматическом режиме. Дальнейшим логическим продолжением данной работы является разработка АСУ ТП под управлением компьютера, который объединит управление всеми конвейерами, машинами и механизмами технологического цикла в единый синхронизированный комплекс, направленный на решение одной задачи: качественного и быстрого получения готовой продукции из животноводческого сырья.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Физико-химическая очистка сточных вод [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://agro.marimmz.ru/> – Дата доступа 07.09.2023.
2. Кузьменко Н.В. Автоматизация технологических процессов и производств: уч. пособие / Н.В. Кузьменко. – Ангарск : АГТА, 2005. – 78 с.
3. Федоров Ю. Н. Справочник инженера по АСУ ТП: Проектирование и разработка [Текст] : учеб.-практ. пособие / Ю. Н. Федоров, 2008. - 926 с.

УДК 681.5

## СХЕМА КОМПЕНСАТОРА РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ БЫТОВЫХ НАГРУЗОК

**Вабищевич Л.И., Ярошевич А.В.**

Брестский государственный технический университет,  
г. Брест, Республика Беларусь

Большинство бытовых потребителей переменного тока являются потребителями индуктивной мощности. Потребителями являются приемники электроэнергии, которые по принципу своего действия используют переменное магнитное поле: асинхронные двигатели, индукционные печи, сварочные трансформаторы, выпрямители и т.п., а также звенья электрической сети – трансформаторы, линии электропередачи, реакторы и другое оборудование. Около 60% всей индуктивной мощности, связанной с образованием переменных магнитных полей, потребляют асинхронные двигатели и около 25% – трансформаторы.

Потребление активной и индуктивной мощности всегда сопровождается потерями. В масштабе электрической системы потерями считаются, мощности, расходуемые в элементах и электрооборудовании электрической сети (в воздушных и кабельных линиях, силовых трансформаторах, реакторах и в другом оборудовании понижающих подстанций). Заметим существенную разницу в соотношении потребления и потерь активной и индуктивной мощности. Основная часть активной мощности потребляется нагрузками, и лишь незначительная (около 10%) теряется в элементах сети. Индуктивная мощность в элементах се-

ти и электрооборудовании обычно соизмерима по величине с активной мощностью, потребляемой нагрузками.

В настоящее время характер нагрузки в цепях бытовых потребителей существенно изменился. Распространение бытовых приборов с трансформаторами, электродвигателями и сложными электронными цепями привело к появлению реактивной (индуктивной) составляющей мощности. По данным [1]  $\cos\varphi$  в таких цепях может составлять  $\cos\varphi = 0,65 \dots 0,97$ . Средневзвешенное значение  $\cos\varphi = 0,85$ .

Передача индуктивной мощности от генераторов электростанций по электрической сети к потребителям вызывает в сети затраты активной мощности в виде потерь. Поэтому, как правило, увеличение выдачи индуктивной мощности генераторами станций с целью доставки ее потребителям нецелесообразно, а наибольший экономический эффект достигается при размещении компенсирующих устройств вблизи потребляющих индуктивную мощность нагрузок.

Анализ [1] многообразия методов управления компенсацией реактивной мощности (РМ) позволяет сделать следующие выводы.

1. Все методы базируются на косвенной оценке величины реактивной мощности и не обеспечивают требуемое значение  $\cos\varphi$  сети.
2. Оценка компенсируемой мощности требует изучения специфических особенностей нагрузки и технологии производственных процессов.
3. Схемы управления компенсацией требуют индивидуального подхода в проектировании и наладке под конкретную ситуацию.
4. Схемы управляющих устройств компенсаторов не отличаются простотой и надёжностью.

На основе этих выводов можно сделать заключение о том, что исключить названные недостатки можно при использовании *автоматического управления компенсацией реактивной мощности на основе измерения величины реактивной мощности в нагрузке* или электрических параметров нагрузки, по которым можно вычислить величину компенсируемой реактивной мощности.

Промышленные устройства ступенчатого регулирования реактивной мощности построены с применением микропроцессорного контроллера и являются сложными и дорогими для массового использования в квартирных и других электрических сетях до 0.4 кВ с нагрузками до 50 кВт.

Исходя из этого, можно сформулировать основные требования к вычислителю компенсатора реактивной мощности для бытовых нагрузок.

1. Для эффективной компенсации реактивной мощности ёмкость конденсаторной батареи должна регулироваться в зависимости от фактического значения реактивной составляющей нагрузки.

2. Использование простых асимптотических формул для расчёта ёмкости позволяет построить простую надёжную схему управления ключами с аналоговым вычислителем для коммутации конденсаторов.

3. Компьютерное моделирование фазового детектора позволило выбрать схему и определить параметры сигнала для управления коммутацией компенсирующих конденсаторов.

4. Использование простой и недорогой схемы в цепях бытовой нагрузки позволит получить существенную экономию за счёт сокращения потерь при передаче электроэнергии.

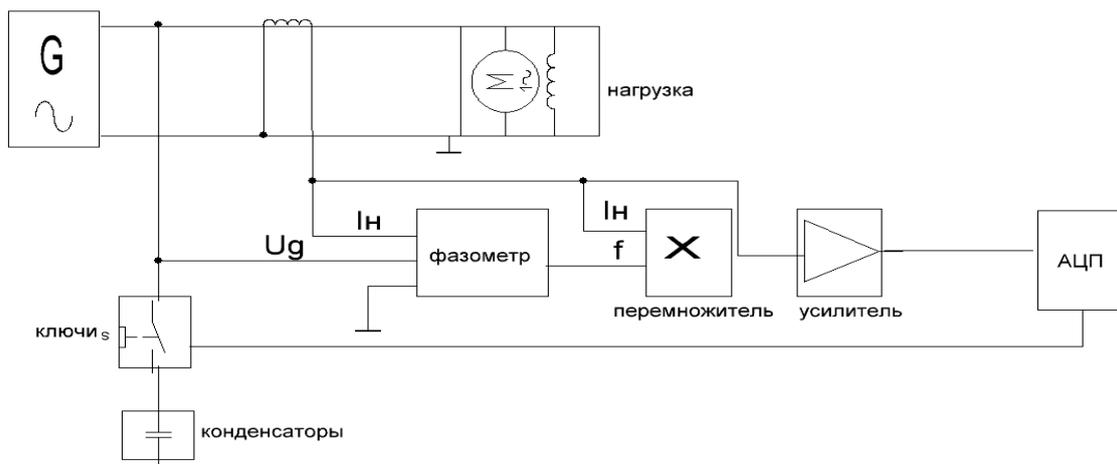
Для обеспечения экономической целесообразности применения решающим параметром должна быть стоимость устройства. Стоимость определяется построением электрических схем из простых и надёжных элементов, количество которых должно быть невелико. Такой подход позволит обеспечить другое важнейшее требование – небольшие габариты – позволяющие встраивать компенсаторы реактивной мощности в квартирные щиты энергоснабжения.

Способ решения этой задачи и некоторые требования к устройствам предложены в [2] путём применения аналоговой схемы вычислителя для компенсатора реактивной мощности.

При реализации схемы компенсации РМ необходимо решить следующие проблемы:

- измерение величины реактивных потерь в реальном времени;
- определение ёмкости компенсирующего конденсатора;
- коммутация к сети ёмкости из конденсаторной батареи.

Общая схема предлагаемого устройства для компенсации РМ бытового потребителя электрической энергии представлена на рис. 1.



**Рисунок 1 – Блок – схема САУ КРМ**

Схема компенсации РМ подключается между счётчиком электроэнергии и нагрузкой потребителя. Основными узлами схемы являются:

- схема измерения разности фаз сетевого напряжения и потребляемого тока, отражающей долю РМ в нагрузке;
- схема управления симисторными ключами для коммутации компенсирующей ёмкости. Схема включает перемножитель параметров тока нагрузки и разности фаз для реализации формулы определения ёмкости конденсаторов для компенсации РМ и усилитель для масштабирования полученного произведения;
- линейка симисторных ключей между конденсаторами батареи и фазным проводом;
- конденсаторная батарея конденсаторов.

Первым этапом вычисления ёмкости компенсирующих конденсаторов является определение разности фаз напряжения и тока потребляемой электроэнергии.

Анализ результатов моделирования позволяет выделить схему фазометра на компараторах с транзисторными ключами. Эта схема имеет максимальную чувствительность и линейную прямо пропорциональную зависимость выходного напряжения от разности фаз входных сигналов. Такой сигнал на выходе схемы может использоваться для управления ключами коммутации конденсаторных батарей с минимальной корректировкой.

В качестве измерителя тока может использоваться измерительный трансформатор или резисторный шунт.

Схему управления ключами предлагается реализовать на основе асимптотических формул для расчёта ёмкости компенсирующего конденсатора [3].

Перемножение аналоговых сигналов  $I_H$  на  $\varphi$  выполняется схемами с операционными усилителями.

С помощью логарифмических схем и ОУ можно выполнять арифметическую операцию  $X \cdot Y = e^{(\ln X + \ln Y)}$ .

Логарифмические схемы изготавливаются на основе диода, включенного в петлю обратной связи ОУ.  $I = I_0(e^{\frac{qU_{VD}}{kT}} - 1)$ ;  $\ln\left(\frac{I}{I_0+1}\right) = \frac{qU_{VD}}{kT}$ ; поскольку  $\frac{I}{I_0} \gg 1$

$$\ln\left(\frac{I}{I_0} + 1\right) \approx \ln\frac{I}{I_0}; U_{VD} = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{I}{I_0}\right); U_{\text{вых.}} = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{U_{\text{вх.}}}{R_{\text{вх.}}I_0}\right).$$

Реализация антилогарифмического усилителя производится аналогично, только в его структуре переставлены местами входные резистор и логарифмический элемент.

Выход схемы управления ключами реализуется на аналогово – цифровом преобразователе, выходы которого управляют тиристорными ключами коммутации компенсаторной батареи.

Структурная схема преобразователя включает в себя источник опорного напряжения  $U_{\text{оп}}$ , резистивный делитель  $R_1 - R_7$ , компараторы ОР7-ОР13.

Для преобразования аналогового сигнала в n-разрядный двоичный код требуется  $N = 2^n - 1$  компараторов. При таком числе компараторов максимальное значение преобразуемого аналогового сигнала определяется соотношением  $U(t) = (1 - \frac{1}{2^n})U_{\text{оп}}$ .

На один вход каждого компаратора подается напряжение  $U_{Xi}$  с соответствующей точкой делителя  $X_i$ , а на второй вход всех компараторов одновременно поступает аналоговый сигнал  $U(t)$ . Таким образом, на входе каждого компаратора постоянно присутствует заданный уровень напряжения, с которым осуществляется сравнение аналогового сигнала.

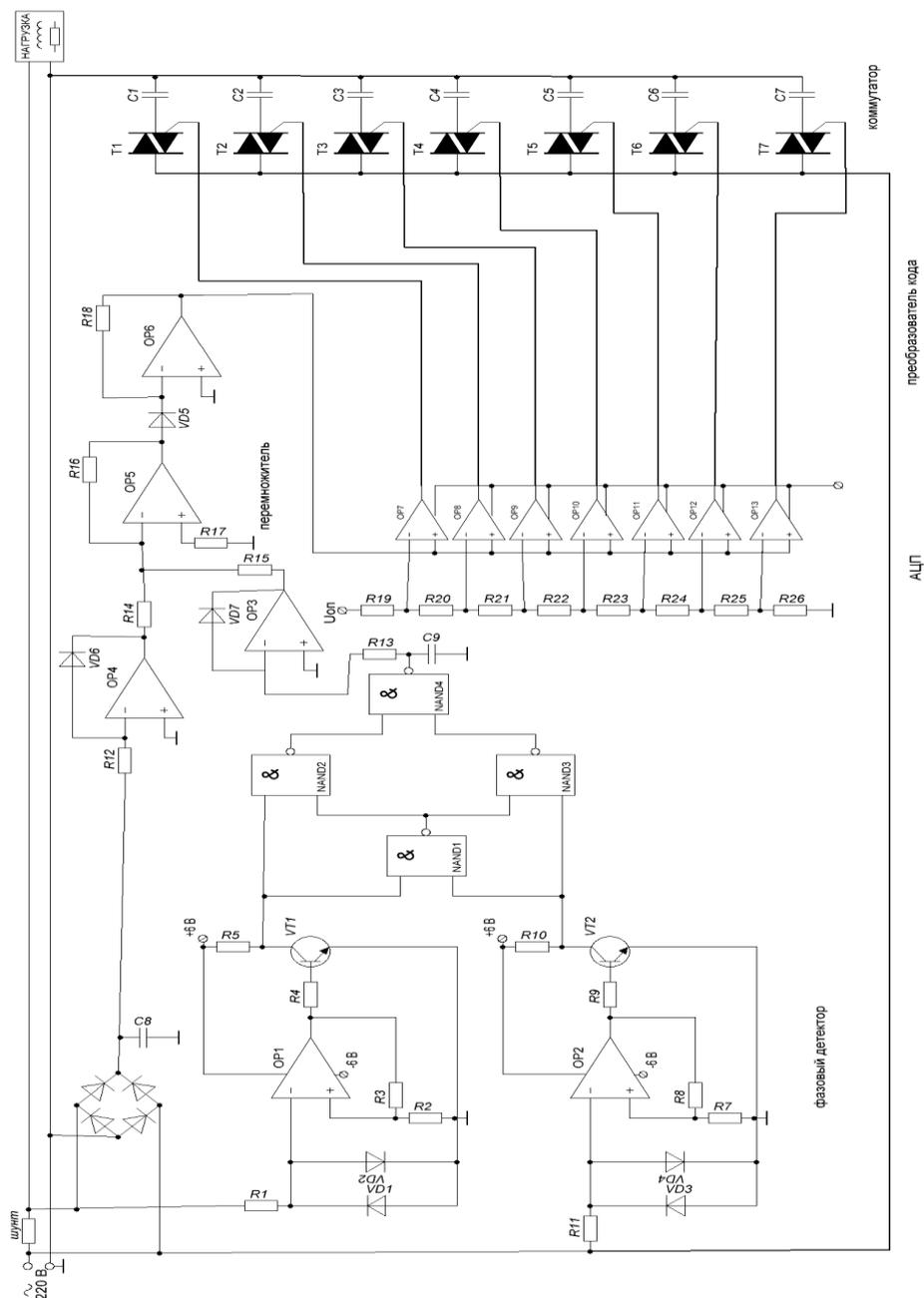
Если величина аналогового сигнала  $U(t)$  превышает уровень напряжения  $U_X$ , подаваемого с делителя на данный компаратор, то на его выходе вырабатывается лог. «1», если  $U(t) < U_X$ , то на выходе будет лог. «0», т.е. результат получается в унитарном коде ( $X_1X_2X_3 \dots$ ). Делитель состоит из восьми резисторов и универсальный код имеет семь разрядов ( $X_1 - X_7$ ).

Для коммутации конденсаторов можно использовать схему на симисторах. Блок коммутаторов создаёт электрическую цепь для тока через блок компенсирующих конденсаторов, составленный из семи ступеней.

Особенности функционирования компенсатора определяются случайным характером формирования индуктивной составляющей нагрузки. Эта неопределённость приводит к неравномерному использованию ключей коммутатора и конденсаторов компенсирующей батареи. Вследствие неравномерности возрастает вероятность потери работоспособности элементов.

В такой ситуации необходимо контролировать состояние коммутаторов и конденсаторов и обеспечивать равномерность нагрузки на элементы.

Общая схема компенсатора представлена на Рис.2.



**Рисунок 2 – Схема компенсатора**

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Шишкин С.А. Реактивная мощность потребителей и сетевые потери электроэнергии // Энергосбережение № 4. 2004.
2. Регулятор реактивной мощности с аналоговым вычислителем. Республика Беларусь / ПАТЭНТ на карыснуюмадэль № 8066 / Аутар Ярошевич А.В. / Зарэгістравана у Дзяржаунымрэестрыкарысныхмадэляу 2011.12.15.
3. А.В.Ярошевич. Схема компенсации реактивной мощности в квартирных электрических сетях // Вестник Брестского государственного технического университета - Физика, математика, информатика. Вып.5(71) – Брест: БрГТУ. 2011. С.66-67.

УДК 621.9

## СТЕНД ДЛЯ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ ИЗ ЛИТИЙ-ИОННЫХ АККУМУЛЯТОРОВ

**В. Н. Кохнюк, А. Н. Дробов, А. А. Паршутто, И. П. Смягликов,  
С. И. Багаев, А. А. Изюмов**

Физико-технический институт НАН Беларуси, г. Минск,  
Республика Беларусь

В настоящее время происходит интенсивное развитие и использование электротранспорта и электронных устройств, в состав которых входят литий-ионные аккумуляторы (ЛИА). Ресурс аккумуляторов в зависимости от типа составляет 500–1000 циклов «заряд-разряд», что обеспечивает устройства энергией, необходимой для их функционирования, в течение 3–6 лет. После этого ЛИА не могут быть использованы по прямому назначению и должны утилизироваться. По прогнозам к 2030 гг. только электротранспорта будет выпущено около 100 млн единиц, соответственно количество отработанных ЛИА будет сопоставимо и с каждым годом актуальность проблемы их утилизации будет возрастать.

Литий-ионные аккумуляторы представляют собой сложные системы, в состав которых входят такие металлы, как кобальт, никель, литий и др., поэтому отработанные ЛИА рационально не просто утилизировать, а подвергать переработке с целью извлечения указанных материалов и повторного их использования в промышленности. Для переработки ЛИА применяются пирометаллургические и гидрометаллургические способы, а также различные их сочетания [1, 2].

При пирометаллургическом процессе отработанные ЛИА перерабатываются при высокой температуре (до 1500 °С) без какой-либо предварительной механической обработки, во время которой оксиды металлов восстанавливаются до сплава кобальта, меди, железа и никеля. При этом такие металлы, как алюминий и литий, теряются в шлаке, а пластик и другие органические компоненты сгорают. Извлечение материалов из ЛИА в указанном процессе составляет 30–40 %.

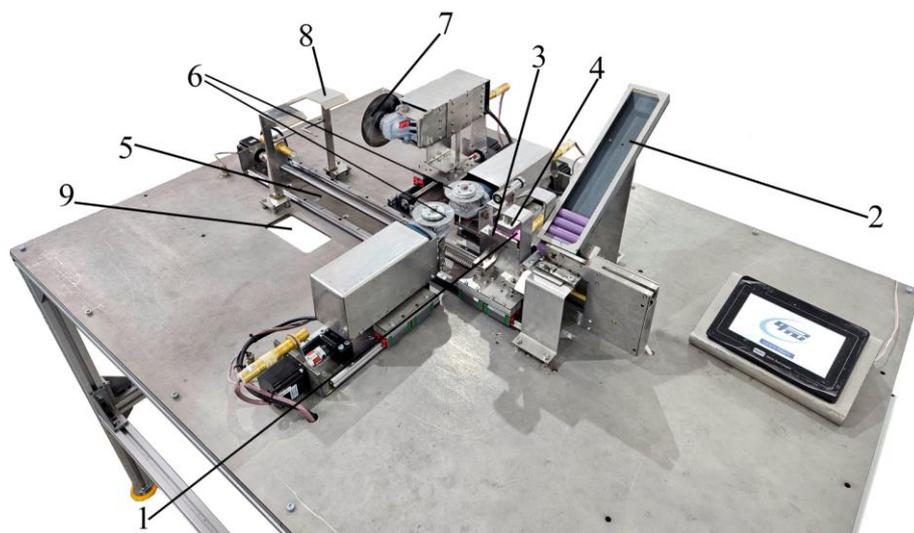
Гидрометаллургический способ основан на химическом растворении компонентов ЛИА с последующим выделением их в виде малорастворимых соединений, например, сульфидов, гидроксидов или карбонатов металлов. Извлечение материалов ЛИА в таком процессе составляет 70–90 %. При гидрометаллургическом способе переработки предварительно необходимо вскрытие корпуса аккумулятора. На сегодняшний момент для этого широко применяют механическое измельчение ЛИА с использованием шредеров, шаровых мельниц, молотковых или роторных ножевых дробилок. В результате измельчения получается смесь частиц разной природы (сталь, электродный материал, металлические фольги (алюминий, медь), пластик, графит и электролит), которую для дальнейшей переработки необходимо разделить на составляющие. Сначала удаляется электролит из электродных материалов, например, путем термической обработки при температуре около 100 °С под вакуумом (при этом происходит испарение органических растворителей с последующей конденсацией). Далее измельченные частицы подвергают разделению на фракции. Способы разделения основываются на использовании различных свойствах частиц в смеси: магнитной восприимчивости, размеров и плотности частиц, гидрофильности и др. От полученной смеси (стальной корпус, электродный материал, металлические фольги, пластик, графит) отделяют частицы корпуса с помощью магнитной сепарации. Для повышения степени разделения магнитную сепарацию, как правило, проводят несколько раз. Для отделения из смеси пластика используют электростатическую или воздушную сепарацию. Металлические фольги отделяют от электродного материала просеиванием с применением сит разных размеров. Например, при использовании вибрационных сит с размером ячеек 3 мм и 500 мкм получаемая фракция > 3 мм подвергается магнитной сепарации. В основном эта фракция состоит из металлических (железо, алюминий, медь) и пластиковых частиц. Фракция < 3 мм, содержащая, в основном, электродный материал и графит, дополнительно разделяется с использованием 500 мкм сит. Фракция > 500 мкм богата медью и алюминием. Фракция < 500 мкм богата кобальтом, никелем и марганцем. В этой фракции также содержатся соединения лития и графит. Графит отделяют от электродного материала с помощью флотации или удаляют пиролизом – сжигают при высоких температурах (до 1500 °С). Оставшийся электродный материал, т. н. «черное вещество», собирается и передается на операцию гидрометаллургической обработки для выделения кобальта, никеля, лития и марганца (в виде солей или гидроксидов).

Процесс переработки ЛИА гидрометаллургическим методом с предварительным механическим измельчением характеризуется многостадийностью и включает в себя операции просеивания, магнитной и электростатической сепарации, тонкого дробления с получением магнитной металлической фракции (железо), немагнитной металлической фракции (алюминий, медь), концентрированного электродного материала, пластика и графита.

Альтернативным способом извлечения электродных материалов при гидрометаллургическом процессе переработки ЛИА является прямая разборка корпуса и последующее разделение анодного и катодного электрода-фольги целиком (не разрушая целостности электродов). Преимущество прямой разборки корпуса ЛИА перед полным измельчением аккумулятора состоит в уменьшении количества операций последующего разделения компонентов ЛИА друг от друга, а также повышении степени чистоты (снижение концентрации инородных примесей) каж-

дой отдельной фракции компонентов ЛИА и электродного материала в частности. К сожалению, использование такого способа в крупномасштабных объемах ограничено, так как разборка корпуса ЛИА на сегодняшний момент осуществляется вручную и успешно реализована в лабораторных условиях [2].

Целью работы является автоматизация процесса прямой разборки корпуса ЛИА тип 18650, которая позволит эффективно и безопасно разделять компоненты ЛИА на отдельные составляющие. Для достижения поставленной цели был разработан и изготовлен стенд для автоматической разборки корпуса ЛИА (рисунок 1). Программная часть реализована на базе микроконтроллера STM32F401 с использованием операционной системы реального времени FreeRTOS. Управление стендом осуществляется с помощью сенсорной панели оператора. Разработанное программное обеспечение позволяет варьировать глубину (200–300 мкм) и скорость резания (10–200 мм/мин), что позволяет разрезать корпус ЛИА с сохранением целостной структуры электродных материалов упакованных в виде рулона.

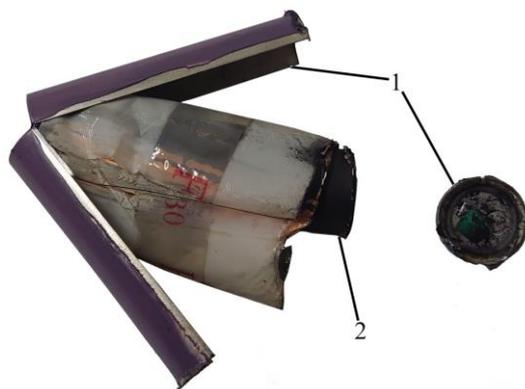


**1 – ЛИА, 2 – загрузочный бункер, 3 – каретка, 4 – прижимной механизм, 5 – направляющая, 6 – прорезные фрезы, 7 – отрезная фреза, 8 – выталкиватель, 9 – приемное окно**

**Рисунок 1 – Стенд извлечения электродных материалов из ЛИА тип 18650**

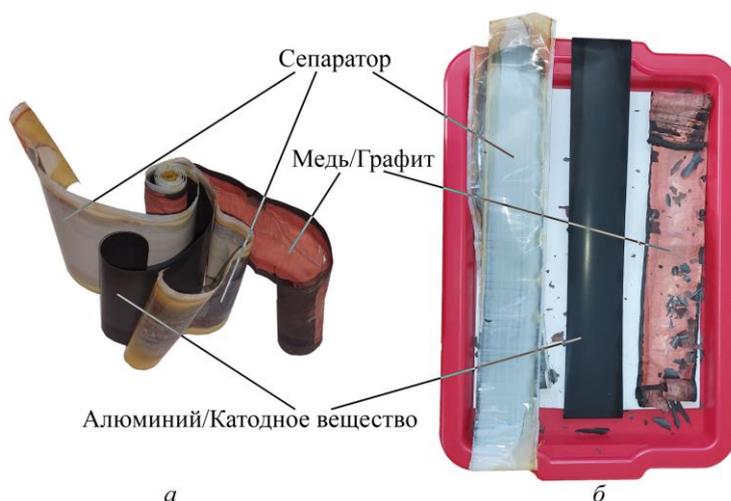
Процесс обработки ЛИА осуществляется следующим образом. На первом этапе происходит автоматический забор предварительно разряженных ЛИА (1) из загрузочного бункера (2) в каретку (3) с прижимным механизмом (4). Далее каретка на холостом ходу по направляющей (5) движется к прорезным фрезам (6). При приближении к фрезам скорость изменяется до рабочей и происходит продольное разрезание корпуса ЛИА. После окончания операции на холостом ходу каретку с ЛИА движется к фрезе (7). При достижении заданной позиции каретка останавливается и происходит отрезание торца ЛИА. Далее на холостом ходу каретка движется к выталкивателю (8), где ЛИА выбрасывается через приёмное окно (9) в емкость для готовой продукции. После чего каретка возвращается в исходное положение. Сверху рабочая зона закрыта защитным кожухом с подключенной вытяжной вентиляцией.

В результате получается разрезанный корпус, из которого легко извлечь электродные материалы в виде рулона (рисунок 2).



**1 – части корпуса, 2 – электродные материалы в виде рулона**  
**Рисунок 2 – Распиленная и разобранная батарея**

При дальнейшей переработке извлеченный из корпуса рулон разматывается на составляющие в виде лент (рисунок 3). Ленты складываются отдельно в зависимости от материала основы (алюминий, медь, пластик) и обрабатываются по отдельности. Такой подход упрощает процесс последующей переработки ЛИА из-за снижения количества примесей и промежуточных операций.



**Рисунок 3 – Литий-ионный аккумулятор после разборки (а) и размотки (б)**

Таким образом, разработанный стенд упрощает отделение электродных материалов от корпуса литий-ионного аккумулятора, что позволяет обрабатывать до 25 изделий в час при обеспечении высокой точности реза.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. A comprehensive review of li-ion battery materials and their recycling techniques / Hee-Je Kim [et al.] // Electronics. – 2020. – V. 9. – P. 1161–1205.
2. Jena, K. Kishore Comprehensive Review on Concept and Recycling Evolution of Lithium-Ion Batteries (LIBs) / Kishore K. Jena, Akram Al Fantazi, Ahmad T. Mayyas // Energy Fuels. – 2021. – V. 35. – P. 18257–18284.

## **ПИЛОТНЫЙ ПРОЕКТ ПРОИЗВОДСТВА ВОДОРОДА НА ТЕРРИТОРИИ ТУРКМЕНИСТНА**

**А. Я. Джумаев**

Государственный энергетический институт Туркменистана

Достижение целей Парижского соглашения по климату, снижение выбросов парниковых газов и сокращение объема потребления ископаемых углеродных топлив стимулирует развитие водородной энергетики. Водород используется для накопления, хранения, транспортировки энергии и является перспективным энергоносителем для развития низкоуглеродной экономики, снижающим антропогенное влияние на изменение климата.

Основными преимуществами водорода являются:

- отсутствие выбросов углекислого газа при его использовании в качестве энергоносителя;
- высокая энергоемкость (в три раза выше, чем у природного газа);
- возможность его получения из различных источников, включая воду, углеводороды, органические материалы.

Ожидается, что в процессе глобальной трансформации мировой энергетической системы (энергетическом переходе), связанной, в первую очередь, с декарбонизацией и низкоуглеродным развитием, ключевую роль будет играть «зеленый» водород. При этом «зеленый» водород рассматривается не только в качестве энергоносителя для сферы конечного потребления, но и в качестве средства хранения и накопления энергии, а также балансировки нагрузки энергосетей (с учетом нестабильности потребления электроэнергии и ее генерации при использовании переменных возобновляемых источников энергии) [1].

Постановлением Президента Туркменистана от 28 января 2022 года была принята Дорожная карта по развитию международного сотрудничества Туркменистана в области водородной энергии на 2022–2023 годы. В рамках этой Дорожной карты планируется реализовать 18 проектов и мероприятий, в частности разработать Национальную стратегию развития водородной энергетики в Туркменистане [2].

Цель пилотного проекта:

- Проанализировать современное состояние и перспективы развития водородной энергетики.
- Рассмотреть возможность реализации пилотного проекта по производству водорода на территории Туркменистана.
- Выбрать подходящее место для строительства объекта.
- Предусмотреть использование возобновляемых источников для снабжения потребителей объекта электроэнергией.
- Изучить существующие методы получения водорода с целью выбора подходящего для использования на территории Туркменистана.
- Рассчитать объемы электроэнергии, вырабатываемой выбранным источником и потребляемой элементами системы получения водорода.
- Определить стоимость реализации пилотного проекта и срок его окупаемости.

Туркменистан обладает большим потенциалом развития водородной энергетики. В пилотном проекте рассматривается строительство двух фотоэлектрических солнечных станций (ФСС) установленными мощностями 100 МВт каждый в Марыйском и Лебапском велаятах в населенных пунктах Серхетабат и Керки. Они могут стать источниками энергии для производства «зеленого» водорода. Если использовать электролизеры для этой цели совместно с ФСС, то нет необходимости в применении специального оборудования как для преобразования вырабатываемого тока (генераторы, инверторы), так и для синхронизации с общей электросистемой. Сырьем для получения водорода с помощью электролизерной установки помимо электрической энергии является вода. Эффективность и надежность работы электролизера напрямую зависит от степени ее очистки. В технологическом процессе получения водорода возможно использование непресной воды, для чего необходимы использовать опреснительные установки. Это может повысить стоимость производства водорода. В среднем влияние мероприятий по подготовке воды оцениваются в размере 1 доллар США / м<sup>3</sup> или около 0,01 доллара США / кг водорода. Процесс электролиза в идеальном случае для получения 1 кг водорода требует 9 кг воды. В расчетах были применены эти данные.

Методы используемые в пилотном проекте:

– Для достижения поставленных целей использовался метод расчета объема электроэнергии, вырабатываемой источником, а также метод определения стоимости реализации пилотного проекта и окупаемости по данным из открытых источников.

– В работе выполнено моделирование объекта, состоящего из источника электроэнергии – фотоэлектрической солнечной станции установленной мощности 100 МВт, системы получения водорода – электролизера мощностью 50 МВт, системы опреснения воды – установки обратного осмоса с производительностью 80 тонн воды в сутки.

– Были анализированы электролизеры различных типов.

### **Результаты и выводы**

Для оценки перспективы совместной работы источников солнечной энергии и электролизера для производства водорода на территории Туркменистана в качестве источника электрической энергии были выбраны ФСС установленными мощностями 100 МВт каждый в Марыйском и Лебапском велаятах в населенных пунктах Серхетабат и Керки. Принято, что потребителями ФСС являются только электролизер и опреснительная установка. В расчетах использовали технические данные электролизера с мощностью 1 МВт (таблица 1). Был выполнен расчет объема электрической энергии, вырабатываемой такой ФСС в течении года:

$$E = E_{udel,\beta} \cdot S = \sum_{i=1}^{12} E_{i,\beta} \cdot \eta_p \cdot \eta_{inv} \cdot \eta_m \cdot S, \quad (1)$$

где  $E$  – выработка ФСС в год;  $E_{udel,\beta}$  – удельная выработка ФСС с учетом наклона  $\beta$  в течении года;  $S$  – площадь ФСС;  $E_{i,\beta}$  – приход солнечной энергии на оптимально ориентированную площадку с углом наклона  $\beta = 36^\circ$  на широтах расположения ФСС в  $i$ -ом месяце. Потери  $\eta_p$  на ФСС составляет до 25 %, а КПД  $\eta_{inv}$  преобразования из постоянного в переменный ток составляет 98,8 %, принятый КПД  $\eta_m$  солнечного модуля 19,2 %.

**Таблица 1** – Технические характеристики электролизерной установки с мощностью 1 МВт

<b>Технические характеристики</b>	<b>Значение и единица измерения</b>
Номинальная мощность	1 МВт
Производительность по водороду	300 Нм <sup>3</sup> /ч, 27 кг/ч
Регулирование производительности по водороду	15-100 %
Удельный расход электроэнергии	4,4 кВт·ч/Нм <sup>3</sup> , 48,88 кВт·ч/кг
Давление водорода на выходе	30–200 кгс/см <sup>2</sup>
Удельная плотность водорода	0,08988 кг/Нм <sup>3</sup>
Нижняя теплотворная способность (НТС)	119,96 МДж/кг (т. е. 33,32 кВт·ч/кг или 3,00 кВт·ч/Нм <sup>3</sup> )

В ходе вычислений были приняты следующие допущения:

– количество часов работы электролизера с установленной максимальной производительностью в день: январь, февраль, декабрь – 3 часа, март, апрель, май, сентябрь, октябрь, ноябрь – 5 часов, июнь, июль, август – 6 часов;

– количество суммарной солнечной энергии поступающая на поверхность солнечной панели, расположенной на населенном пункте под углом наклона

$\beta = 36^0$  южной ориентации: Атамурат (Керки), Лебапский велят: 1919,328 кВт·ч/м<sup>2</sup> год; Серхетабат (Кушки), Марыйский велят: 1892,972 кВт·ч/м<sup>2</sup> год.

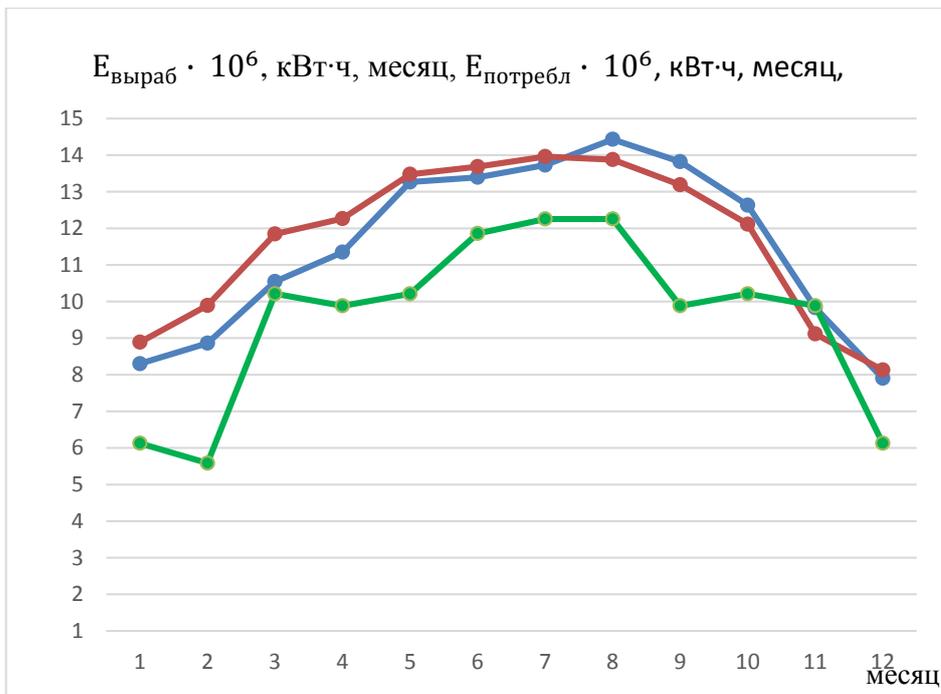
Мощность электролизера была выбрана исходя из того, что ФСС будет покрывать его потребности в электроэнергии, следовательно, производство водорода будет зависеть от выработки и режима работы ФСС. Исходя из этого, было решено выбрать электролизер мощностью 50 МВт.

Используя данные, приведенные в таблице 1 была рассчитана масса водорода (рисунок 2), получаемая выбранным электролизером соответствующей мощностью:

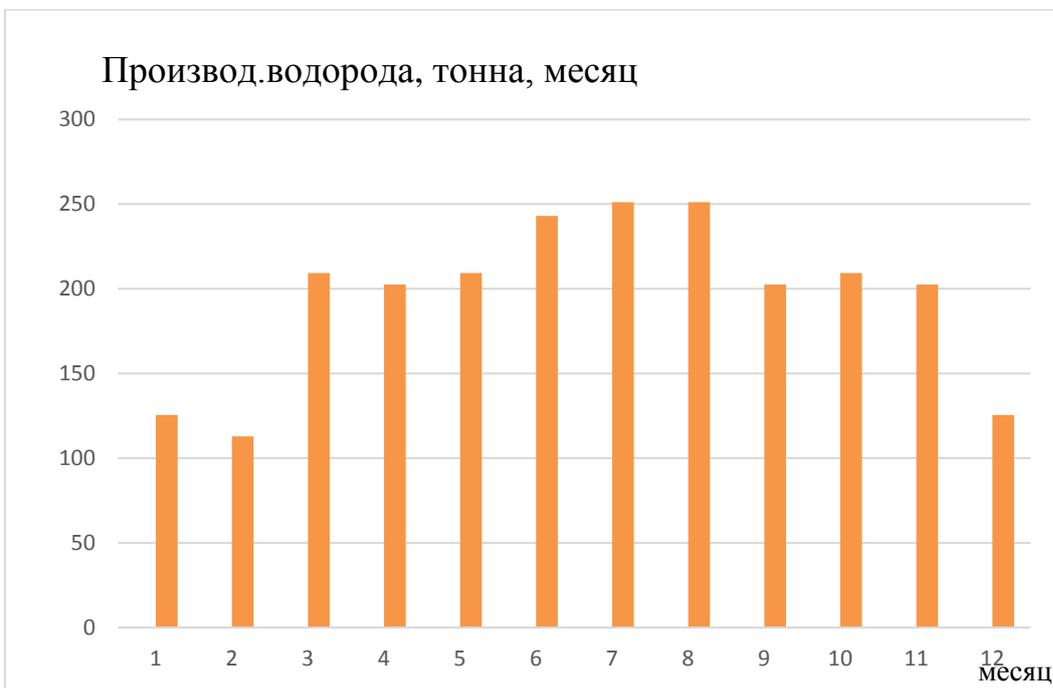
$$m = \sum_{i=1}^{12} m_i = \sum_{i=1}^{12} \eta_{el} \cdot t_i \cdot N_i, \quad (2)$$

где  $m$  – масса полученного водорода в течении года;  $m_i$  – масса водорода, получаемая электролизером в  $i$ -ом месяце;  $\eta_{el}$  – эффективность работы электролизера;  $t_i$  – количество часов работы электролизера с установленной максимальной производительностью в день;  $N_i$  – количество дней в месяц.

Определены баланс энергии, вырабатываемой и потребляемой элементами системы получения водорода (рисунок 1).



**Рисунок 1 – Вырабатываемая электрическая энергия ФСС и потребляемая энергия электролизера (красн. син. – выраб. энерг. ФСС, зел. – потребл. энерг. электролизера)**



**Рисунок 2 – Производство водорода в течении месяца**

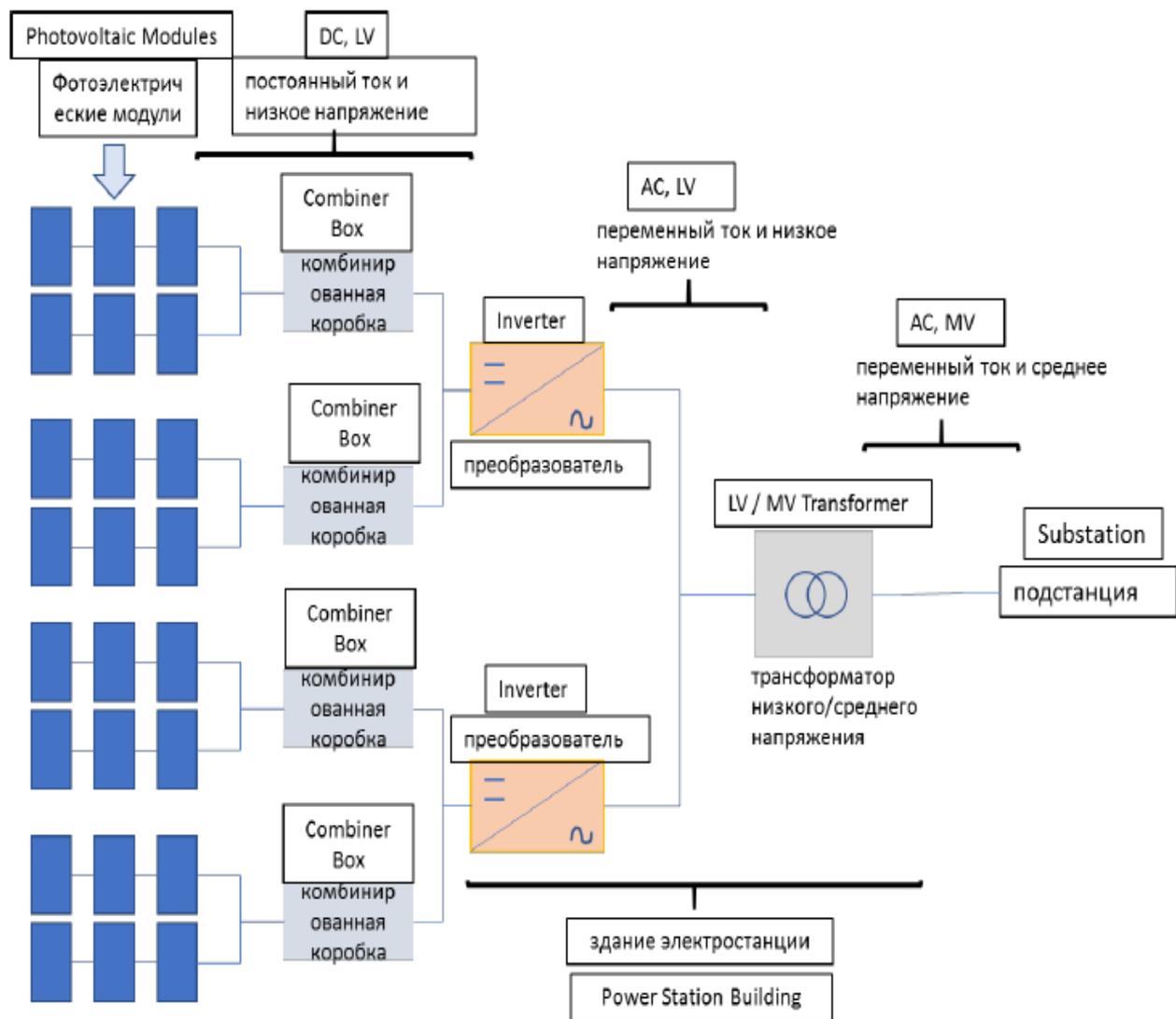
В таблицах 2 и 3 приведены технические характеристики основного базового блока и ФСС мощностью 100 МВт. Схема основного базового блока показана на рисунке 3.

**Таблица 2** – Технические характеристики основного базового блока

1	Мощность ФСС	2745x2 = 5490 кВт
2	Мощность фотоэлектрического модуля	380 Вт
3	Количество фотоэлектрических модулей	7224x2 = 14448
4	Количество фотоэлектрических модулей соединенных последовательно в ряде	28
5	Количество рядов	258x2 = 516
6	Площадь фотоэлектрических модулей	28578 м <sup>2</sup>
7	Количество инверторов	2
8	Номинальная мощность инвертора	2841 кВА

**Таблица 3**– Технические характеристики ФСС мощностью 100 МВт

1	Мощность ФСС	100 МВт
	Количество основных базовых блоков	18
	Мощность основного базового блока ФСС	5490 кВт
2	Мощность фотоэлектрического модуля	380 Вт
3	Количество фотоэлектрических модулей	260064
4	Количество фотоэлектрических модулей, соединенных последовательно в ряде	28
5	Количество рядов	9288
6	Площадь фотоэлектрических модулей	514406 м <sup>2</sup>
7	Количество инверторов	36
8	Выработка электроэнергии за год	138,538·10 <sup>6</sup> кВт·ч



Активат

**Рисунок 3 – Схема основного базового блока**

В пилотном проекте рассматривается строительство двух фотоэлектрических солнечных станций (ФСС) установленными мощностями 100 МВт каждый в Марыйском и Лебапском велятах в населенных пунктах Серхетабат и Керки и основные полученные результаты приведены в таблице 4. Реализация данного пилотного проекта позволяет производить в течении года 2344,45 т «зеленого» водорода.

#### Таблица 4 – Основные результаты пилотного проекта

<i>Технические параметры и информация</i>	<i>Значение и единица измерения</i>
Населенный пункт, координаты	Атамурат (Керки): с. ш. 37,8 <sup>0</sup> ; в. д. 65,2 <sup>0</sup> Серхетабат (Кушки): с. ш 35,2 <sup>0</sup> ; в. д. 62,4 <sup>0</sup>
Количество суммарной солнечной энергии, поступающей на поверхность солнечной панели, расположенной в населенном пункте под углом наклона $\beta = 36^0$ южной ориентации	Атамурат (Керки): 1919,328 кВт·ч/м <sup>2</sup> год Серхетабат (Кушки): 1892,972 кВт·ч/м <sup>2</sup> год
Выработка электрической энергии ФСС за год	Атамурат (Керки): 140,467 · 10 <sup>6</sup> кВт·ч Серхетабат (Кушки): 138,538 · 10 <sup>6</sup> кВт·ч
Производство водорода	2344,45 т
Потребление энергии при производстве водорода	114,443 · 10 <sup>6</sup> кВт·ч
Потребление воды при производстве водорода	21104,550 т

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Экономический и социальный совет. ООН. ECE/Energy/2022/8. Distr.: General 13 July 2022, Russian Original: English.
2. “Türkmenistanyň wodorod energiýasy babatda halkara hyzmatdaşlygy ösdürmek boýunça 2022–2023-nji ýyllar üçin ÝOL KARTASY”. Türkmenistanyň Prezidentiniň 2022-nji ýulyň 28-nji ýanwarynda çykaran 2581-nji Karary bilen tassyklanyldy.

## **РОБОТИЗИРОВАННАЯ МОБИЛЬНАЯ СИСТЕМА СОРТИРОВКИ ЦВЕТНЫХ ОБЪЕКТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИСТЕМЫ КОМПЬ- ЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ**

**В. В. Дубатовка, Т. А. Кудан, Д. А. Филон**

Учреждение образования «Национальный детский технопарк»;  
г. Минск, Республика Беларусь

Актуальность создания устройства, помогающего человеку в выполнении несложных рутинных (часто повторяющихся) операций, в современную эпоху не вызывает сомнений.

Роботы с системами компьютерного зрения все больше завоевывают мировой рынок робототехники. Так, например, существует большое количество моделей роботов-сортировщиков, по себестоимости они практически не отличаются от других промышленных робототехнических комплексов, имеющих системы оучувствления второго поколения (датчики и сенсоры внешней среды).

Разработка интеллектуальных роботизированных технических средств с использованием системы компьютерного зрения для распознавания визуальной информации и принятия решений в настоящее время стала актуальна не только на производстве, но и для сервисных функций, а также в бытовом секторе.

Цель проекта – роботизация процесса поиска, сбора, сортировки и транспортировки объектов с помощью подсистемы технического зрения на мобильной платформе.

Задачи проекта:

Провести анализ существующих методов поиска и выделения объектов с помощью камеры.

Интегрировать в общую систему мобильного робота камеру и наладить получение полезной информации.

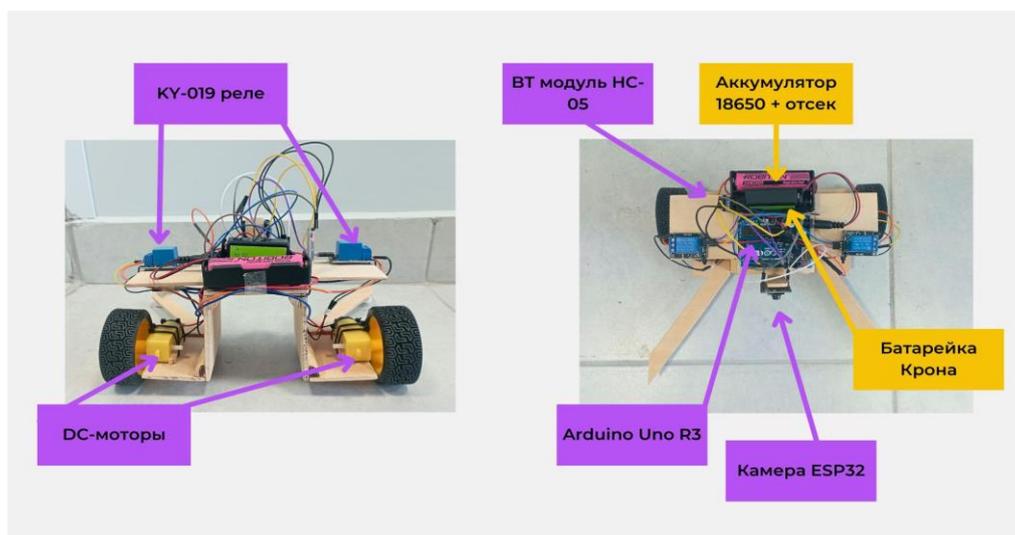
На основе данных с камеры задать вектор направления и скорости движения мобильного робота.

Наладить процесс сбора и сортировки объектов роботом.

Разрабатываемая роботизированная мобильная система сортировки цветных объектов с использованием системы компьютерного зрения будет иметь широкую сферу применения, так как включает в себя мобильную платформу, которая позволяет осуществлять автономное перемещение по управляющим сигналам от системы компьютерного зрения или дистанционного управления пользователем. На белорусском рынке аналогов с такой функцией нет. Помимо дистанционного управления присутствует функция сбора теннисных мячей в специальное устройство на платформе. Данная функция особенно эффективна в критерии уменьшения человеческого фактора для данной операции. Прототип системы основан на мобильной роботизированной платформе небольших размеров, что позволяет пользователю настраивать ее функционал под конкретные условия внешней среды.

Прототипом разрабатываемой системы послужил проект «Роботизированная мобильная система сбора теннисных мячей с игрового поля», реализованный на 5 образовательной смене 2023 года учащимися УО «Национальный детский технопарк» Филоном Денисом, Кудан Татьяной и Салоевой Садаф.

Вид прототипа разрабатываемой системы и мобильной базы представлены на рисунке 1.



**Рисунок 1 – Прототип разрабатываемой роботизированной мобильной системы сортировки цветных объектов с использованием системы компьютерного зрения**

Роботизированная мобильная система сортировки цветных объектов с использованием системы компьютерного зрения включает в себя мобильную роботизированную платформу, управляемую от микроконтроллера семейства AVR ATmega328P (платформа Arduino Nano), в качестве приводной части выбраны двигатели постоянного тока со встроенным редуктором и энкодерами. Роботизированная мобильная платформа оснащена подсистемой компьютерного (технического) зрения (СТЗ), дополнительными устройствами и датчиками параметров внешней среды.

В качестве устройства управления был выбран одноплатный компьютер Raspberry pi V4 B 8GB RAM и вспомогательное устройство Arduino Nano.

Для данной платформы можно использовать среду разработки Visual Studio Code и Arduino IDE с языком программирования C/C++.

Система может работать как полностью в автоматическом режиме, так и быть автоматизированной – когда управленческая функция возложена на пользователя, поскольку не всегда достаточно информации с датчиков и СТЗ для принятия решения.

Траектория движения роботизированной мобильной платформы, переносящей устройство – приёмник для теннисных мячей, зависит от исходных размеров обслуживаемой рабочей зоны и индивидуальных предпочтений пользователя.

Мобильная часть разрабатываемой системы приводится в движение двигателями постоянного тока (ДПТ), подключаемыми к управляющему микроконтроллеру через драйвер.

Подсистема распознавания объектов представляет собой полноценную систему технического зрения на базе цифровой камеры Камера Logitech c270.

Камера для подсистемы распознавания выбиралась по нескольким критериям:

- Камера должна быть известного производителя, чтобы не было проблем с поиском технической информации.
- Использование камеры в проектах с компьютерным зрением другими разработчиками.
- Соотношение цена/качество – камера должна была быть недорогой.

Исходя из вышеперечисленных критериев, выбор пал на веб-камеру Logitech c270.

В процессе работы были исследованы методы обнаружения, такие как: цветовые маски, каскады Хаара и Нейронные модели Yolo (You Look Only Once).

Алгоритм обнаружения объектов YOLO, который может выполнять классификацию и локализацию (обнаружение) объектов одновременно, просматривая изображение только один раз.

В ходе работы просматривались 2 версии моделей YOLO, YOLO v3 и YOLO v8.

Модель, обученная на основе 3-й версии YOLO, показала порог распознавания в 87.54 % и время распознавания объектов на кадре в 1100 мс.

Модель, обученная на основе 8-й версии YOLO, показала порог распознавания в 89.11 % и время распознавания объектов на кадре в 960 мс.

Также в ходе работы были обучены модели YOLO v8 nano и YOLO v8 small, сравнение с YOLO v3 не проводилось по причине того, что данная классификация была введена с 5-й версии моделей.

Наиболее хорошие результаты показала обученная модель YOLO v8 nano (рисунок 2), обученная на наборе данных из 617 изображений размера 640\*640 и размеченных согласно рекомендациям разработчиков.

После обучения данная модель показала следующие результаты: порог распознавания в 89.71 % и время распознавания объектов на кадре в 215 мс.

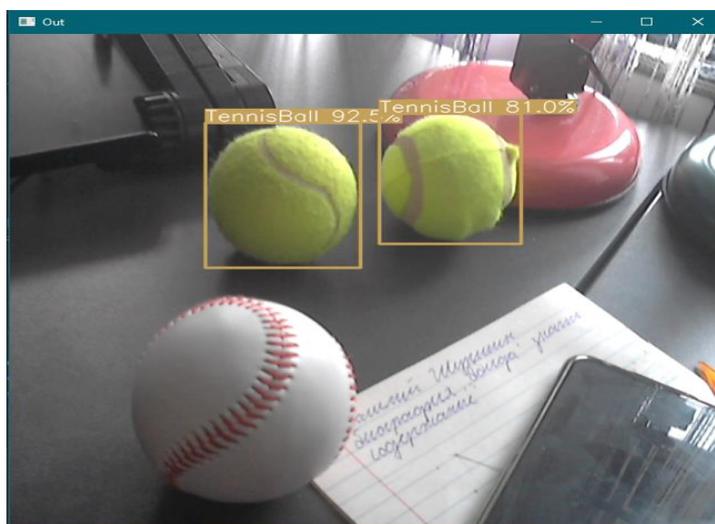


Рисунок 2 – Детектирование объектов моделью YOLO v8 nano

Оборудование, использованное в ходе тестов:

Процессор: Intel Core i5-10210U

Видеокарта: MX 250(Notebook)

Оперативная память: 8GB DDR4

Тип накопителя: SSD

Роботизированная мобильная система сортировки цветных объектов с использованием системы компьютерного зрения должна обрабатывать информацию с камеры СТЗ и идентифицировать цветные объекты. Объекты, распознанные как теннисные мячи салатного цвета определённого, заданного размера, должны собираться в специальное устройство сбора мячей, находящееся на мобильной робототехнической платформе.

Мобильная роботизированная система должна перемещаться по заданному маршруту в поиске теннисных мячей.

Распознанные как теннисные мячи объекты на поле собираются и увозятся для выгрузки в корзины.

Поскольку система предполагает работу как в автономном режиме, так и автоматизированное дистанционное управление пользователем, то алгоритм основной управляющей программы будет включать в себя несколько подпрограмм с возможностью выбора режима работы.

Моторы колес управляются через быстрый прямой ШИМ (Fast PWM non-inverted) с помощью аппаратных таймеров микроконтроллера.

Режимы работы:

- автономная работа поиска по данным СТЗ;
- перемещение по рабочей зоне под контролем пользователя;
- работа через мобильное приложение;
- ручное дистанционное управление.

Функционал разработанной роботизированной мобильной системы сортировки цветных объектов с использованием системы компьютерного зрения полностью соответствует заданию и реализует весь алгоритм с помощью выполнения программы, записанной в микроконтроллер.

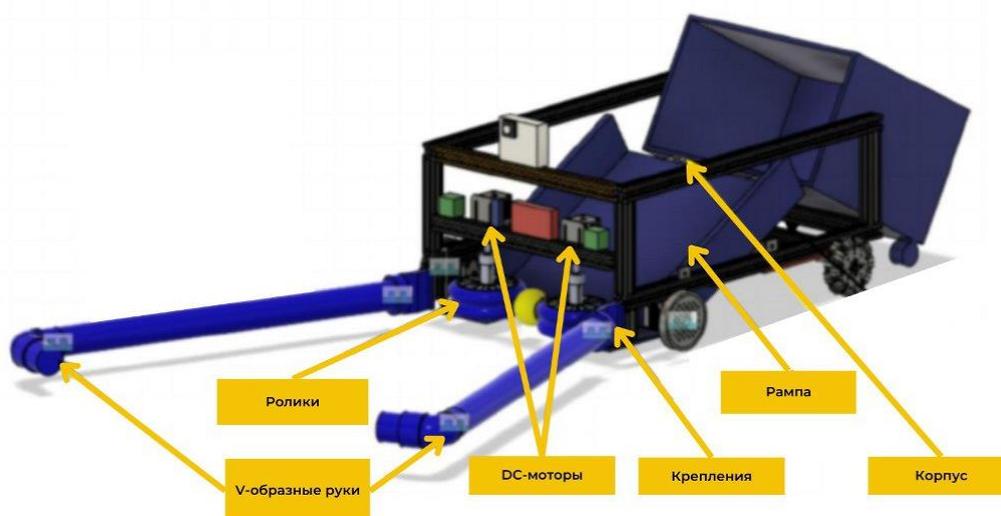


Рисунок 3 – 3D модель разработанной системы

Роботизированная мобильная система работает в автономном цикле с возможностью реализации различных режимов и заданий, как-то: ручное управление; перемещение по рабочей зоне; сбор теннисных мячей по информации СТЗ; плавное изменение скорости перемещения мобильной подсистемы.

Таким образом, можно сделать вывод, что разработанный прототип роботизированной мобильной системы сортировки цветных объектов с использованием системы компьютерного зрения полностью обеспечивает весь спектр заявленных заданий и может быть взят за перспективную модель для последующей производственной реализации.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Матрунчик, Ю. Н. Микропроцессорные системы управления. Лабораторный практикум / Ю. Н. Матрунчик. – Минск : БНТУ, 2020. – 66 с. [Электронный ресурс]– Режим доступа: <https://rep.bntu.by/handle/data/70441?show=full>. – Дата доступа: 14.10.2023.

2. Матюшин, А. О. Программирование микроконтроллеров: стратегия и тактика / А. О. Матюшин. – М. : ДМК Пресс, 2017. – 355 с.

УДК 658.5

### **ОСОБЕННОСТИ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В МАШИНОСТРОЕНИИ**

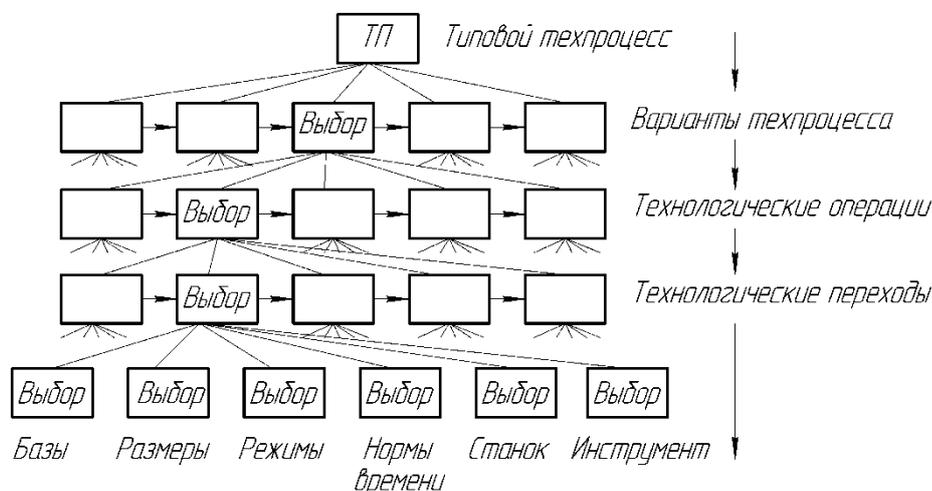
**Я. В. Кудрицкий, А. М. Левданский, Н. С. Ялковский**  
Брестский государственный технический университет,  
г. Брест, Республика Беларусь

Главными особенностями проектирования технологических процессов в машиностроении являются многовариантность и низкий уровень формализации при решении большинства проектных задач. Поэтому проектирование технологических процессов механической обработки в основном представляет собой последовательный выбор типовых решений в соответствии с определенными условиями производства и параметрами детали.

На данный момент сложно назвать САПР ТП, позволяющую обеспечить максимально высокую степень автоматизации при решении всего спектра проектных задач, связанных с технологической подготовкой производства.

Можно сказать, что САПР технологических процессов в машиностроении имеет степень автоматизации выше среднего уровня, где порядка 20 % проектных задач решается инженером в ручном режиме, основываясь на собственном опыте и знаниях, а остальная часть выполняется автоматически, по заложенным в программном обеспечении алгоритмам.

В общем случае процесс автоматизированного проектирования в технологии машиностроения можно представить в виде многоуровневой структуры (рисунок 1). В результате такого разделения процесс проектирования сводится к решению задач с различной степенью детализации на взаимосвязанных уровнях.



**Рисунок 1 – Схема выбора варианта технологического процесса**

По этой схеме промежуточные результаты могут использоваться в качестве исходных данных для следующего проектирования. Это позволяет использовать на каждом уровне более простые модели и алгоритмы.

В разработках программного обеспечения для САПР ТП обычно заложены алгоритмы трех основных методик автоматизированного проектирования техпроцессов. Рассмотрим вкратце эти три основных метода.

1. Метод прямого проектирования предполагает, что подготовка проектного документа возлагается на пользователя, выбирающего типовые решения.

По этому методу процесс проектирования сводится к выбору из пользовательского меню различных уровней: операций; переходов; оборудования; оснастки. Выбранная информация автоматически заносится в графы и строки шаблона маршрутной или операционной карт. Все возможные варианты при такой методике находятся в базе данных, которая открывается в виде окна.

2. Метод анализа выполняется по схеме: а) ввод описания чертежа детали;

б) определение конструкторско-технологического кода детали; в) поиск по коду в базе данных приемлемого техпроцесса; г) анализ структуры базового техпроцесса и его доработка под конкретную деталь; д) оформление индивидуального техпроцесса.

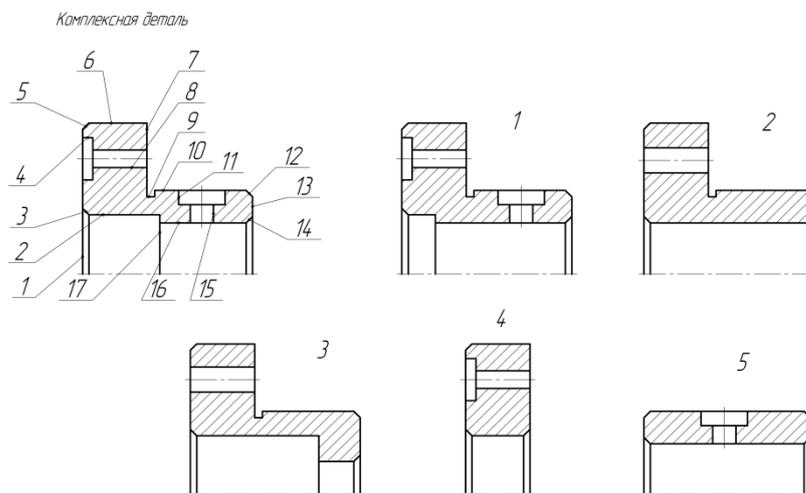
Порядок подготовки к реализации метода анализа:

1. Из множества деталей заводской номенклатуры выбираются группы с общими признаками, включая типы заготовок и способы обработки.

2. Для каждой группы деталей формируется обобщенная модель (комплексная деталь), конструкция которой включает все многообразие поверхностей рассматриваемой группы.

3. Для комплексной детали разрабатывается унифицированный техпроцесс, который является избыточным. В данном техпроцессе содержится описание операций и переходов для всех деталей группы. В соответствии с данной

методикой, у деталей группы выявляются типовые поверхности, которые могут быть получены одним способом. Все эти поверхности включаются в комплексную деталь. Каждой характерной поверхности присваивается произвольный номер. Техпроцесс обработки конкретной детали формируется путем уточнения общих поверхностей с комплексной деталью группы. Затем производится выбор из группового техпроцесса только тех операций и переходов, которые необходимы для обработки поверхностей заданной детали.



**Рисунок 2 – Эскизы группы подобных деталей и комплексной детали**

В ходе проектирования методом анализа выполняются следующие шаги:

1. Определяется принадлежность новой детали к определенной группе. Для этого сопоставляется конструкторско-технологический код детали с кодом комплексной детали.

2. Выполняется анализ с целью корректировки структуры унифицированного ТП комплексной детали. В ходе анализа проверяется необходимость включения в индивидуальный ТП каждой операции и перехода из унифицированного ТП. Для этого каждой операции и переходу унифицированного ТП должна соответствовать логическая функция.

Логическая функция включает геометрические особенности поверхностей; вид заготовки; требуемую точность обработки; качество поверхностного слоя; габаритные размеры.

В общем виде логическая функция выбора определенной операции имеет вид:

$$f_k = \bigvee_{j=1}^{n_2} \left( \bigwedge_{i=1}^{n_1} A_i \right), \quad (1)$$

где  $A_i$  – условия для группы деталей;

$n_1$  – число условий, связанных конъюнкцией (И; логическое умножение);

$n_2$  – число условий, связанных дизъюнкцией (ИЛИ; логическое сложение).

Для некоторых операций, которые являются общими для всех деталей группы, логическую функцию можно не писать.

Таким образом выполняется пошаговое формирование структуры индивидуального ТП.

3. Выполняется параметрическая настройка – т. е., выбор оборудования; оснастки; расчет режимов резания; норм времени и т. д.

Данный метод является основным при проектировании технологических процессов (особенно групповых и типовых).

### 3. Метод синтеза

Общая схема метода синтеза: 1. Ввод описания чертежа детали. 2. Синтез маршрута обработки для всех поверхностей. 3. Формирование этапов обработки в соответствии с принципиальной схемой ТП. 4. Упорядочение операций в маршруте. 5. Упорядочение переходов в операциях. 6. Доработка по описанию чертежа детали. 7. Оформление документации.

Алгоритмы построения САПР на основе метода синтеза существенно отличаются друг от друга. Это связано с тем, что: а) проектируются детали определенного класса; б) проектируются детали любой сложности; в) разная степень полноты технологических указаний в описании деталей; г) разные особенности типа и условий производства.

Но при этом разработка индивидуального техпроцесса ведется синтезом из элементарных маршрутов обработки поверхности.

Синтез маршрута обработки поверхности – это определение последовательности методов обработки, необходимых для достижения требуемых параметров по чертежу детали. Между методами обработки и параметрами поверхности существует зависимость, описываемая функцией:  $M_i: C_{i-1} \rightarrow C_i$ , которая задает технологическое преобразование поверхности с параметрами низкого качества  $C_{i-1}$  в поверхность с параметрами более высокого качества  $C_i$ , посредством метода  $M_i$ .

Так как существует множество методов обработки, обеспечивающих выполнение заданных условий, то возможные варианты обработки поверхности можно представить в виде графа  $G(C; M)$ .

Множество «С» вершин графа характеризует параметры промежуточных состояний данной поверхности. Например:

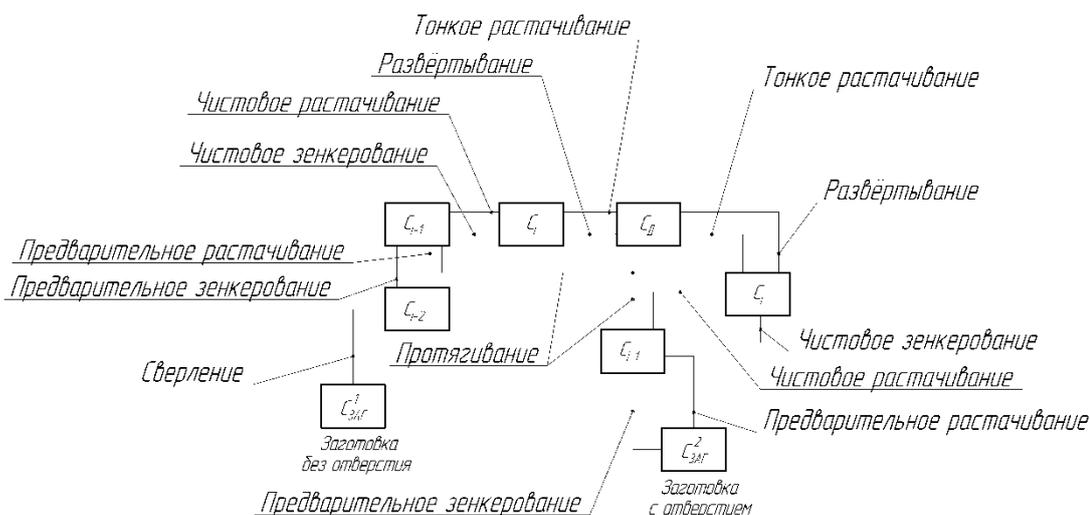


Рисунок 3 – Граф выбора методов обработки (вариант)

В большинстве случаев алгоритмы выбора МОП (маршрут обработки поверхности) имеют форму таблиц. В таблицу вносятся все возможные типовые МОП и ряд условий выбора определенного варианта.

Выбор допустимых вариантов МОП производится с помощью таблиц соответствий.

Например, составим таблицу соответствия для выбора маршрута обработки детали, показанной на рисунке 4.

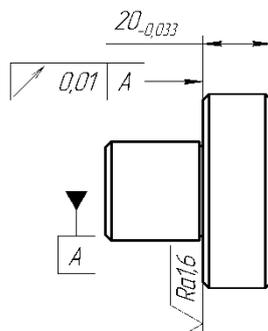


Рисунок 4 – Проектируемая деталь

Таблица 1 – МОП тел вращения

Код МОП	Код методов	Вид обработки	Квалитет	Ra, мкм
12	100	Точение черновое	16–14	20–25
	101	Точение получистовое	13...12	12,5...6,3
13	100	Точение черновое	16–14	20–25
	101	Точение получистовое	13–12	12,5...6,3
	102	Точение чистовое	11–10	3,2
14	100	Точение черновое	16–14	20–25
	101	Точение получистовое	13...12	12,5...6,3
	102	Точение чистовое	11–10	3,2
	103	Точение тонкое	9...8	2,5...1,6
15	100	Точение черновое	16...14	20...25
	101	Точение получистовое	13...12	12,5...6,3
	502	Шлифование получистовое	10...8	3,2...2,5
	503	Шлифование чистовое	7...6	1,6...1,25

Таблица 2 – Выбор МОП (таблица соответствия)

Условия выбора МОП																
Тип поверхности			Точность размера					Шероховатость				Термообработка				Код МОП
Цилин-	Торцо-	Другая	...	14	11	9	7	12,5	3,2	2,5	0,4	Без ТО	Цемен-	Закалка	Азоти-	
				>	...	...	...	...	...	...	...					
0	1	...	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	12
0	1	...	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	13
0	1	...	0	0	0	<b>1</b>	0	0	0	<b>1</b>	0	<b>1</b>	0	0	0	<b>14</b>
0	1	...	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	1	0	15

Для принятых исходных данных выбирается код обработки [14], т. е. следующий состав и порядок выполнения технологических операций и переходов:

Точение черновое + Точение полустачное + Точение чистовое + Точение тонкое.

Если бы на чертеже были указания по термообработке, то при остальных тех же данных был бы выбран код [15].

Следующая задача – из отдельных МОП строятся допустимые технологические процессы обработки.

Основываясь на вышесказанном, можно сделать следующий вывод. САПР технологических процессов являются типичным примером человеко-машинных систем, в которых инженеры решают творческие задачи, а типовые и шаблонные части проекта выполняются с помощью ЭВМ. Но при этом САПР ТП обладают всеми признаками современных САПР, предполагая открытость, возможность развития и интеграции с другими компонентами и системами.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Кондаков, А. И. САПР технологических процессов / А. И. Кондаков. – М.: Издательский центр «Академия», 2008. – 272 с. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.twirpx.com/file/37727/>.

2. Андриченко, А. Н. Три поколения отечественных САПР технологических процессов / А. И. Андриченко. – СТАНКОИНСТРУМЕНТ / Информационные технологии; 2017. № 1 (006). – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [www.stankoinstrument.su/](http://www.stankoinstrument.su/).

УДК 681.5

## РОБОТИЗИРОВАННАЯ МОБИЛЬНАЯ СИСТЕМА ЗДОРОВОГО СНА И ПРОБУЖДЕНИЯ

**Ю. Н. Матрунчик<sup>1</sup>, Е. Г. Красько<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Белорусский национальный технический университет;  
г. Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Учреждение образования «Национальный детский технопарк»;  
г. Минск, Республика Беларусь

В процессе освоения индивидуальной учебной программы дополнительного образования одаренных детей и молодежи для дистанционной формы получения образования по направлению «Робототехника» («Сервисные роботизированные системы») учащейся УО «Национальный детский технопарк» Красько Елизаветой Георгиевной был реализован проект изобретательского характера «Роботизированная мобильная система здорового сна и пробуждения».

Актуальность программы обуславливается неизменным ростом роботизации всех сфер жизнедеятельности человека, отраслей народного хозяйства и

промышленности. Учащейся предоставляется возможность изобретения собственного законченного устройства, которое может послужить прототипом роботизированного технического средства (системы, комплекса и т. п.), актуальным в современном научном мире и способном на должном уровне соперничать с существующими аналогами на рынке робототехники. А также предоставляется возможность научиться создавать элементы конструкции сложных роботизированных средств по собственным цифровым трехмерным моделям с использованием современных САПР и 3D-печати и разрабатывать собственные управляющие программы микроконтроллеров при реализации аппаратно-программной части роботизированных систем.

Цель реализации программы: совершенствование творческих способностей учащейся, приобщение ее к современным технологиям и знакомство с тенденциями развития в области робототехники, развитие навыков в научной и практической деятельности.

Задачи:

ознакомить со способами создания сервисных роботизированных технических средств и робосистем – ассистентов, необходимых для улучшения качества жизни человека, помощи в различных сферах его жизнедеятельности, а также в быту;

привить навыки и умения при разработке сервисных роботизированных мобильных или стационарных систем в ходе реализации проекта;

формировать у учащейся способности к принятию самостоятельных продуманных решений при реализации ранее запланированных задач, умения рационально организовывать свою научно-практическую и исследовательскую деятельность.

Прототипом для разрабатываемой системы здорового сна и пробуждения послужил исследовательский проект «Роботизированная мобильная система пробуждения «Умный будильник» образовательной смены УО «Национальный детский технопарк» (разработчики - Красько Елизавета, Згирская Дарья, Карла Никита). Данная система была построена на базе робототехнического набора с использованием датчиков набора «Схемотехника» и робототехнического набора-конструктора «Машина-робот 4-хколесная Keystudio 4WD BT Robot Car V2/0 Kit for Arduino». В качестве устройства управления был выбран микроконтроллер ATmega328P на платформе Arduino UNO. Система была спроектирована по принципу «Умный будильник».

Создание будильника является актуальной задачей в нашей современной жизни. В мире, где люди все больше заняты работой и другими обязательствами, важно иметь возможность точно отслеживать время и быть готовыми к началу нового дня. Поэтому создание умного будильника остается актуальной задачей, которая помогает людям организовывать свой день и повышать эффективность своей жизни.

Кроме того, задача простого оповещения (звонок будильника) должна быть дополнена:

– подсистемой здорового сна и пробуждения, т. е. программной настройки срабатывания будильника по оптимальным временным параметрам и индивидуальным предпочтениям (заданию) пользователя;

- подсистемой автоматизированной проверки параметров окружающей среды помещения для сна (температура окружающего воздуха, влажности воздуха, уровня естественного освещения помещения и т. п.);
- роботизированной мобильной подсистемой перемещения «убегающий будильник» на базе робокомплекта робот – балансир;
- подсистемой отображения всех необходимых параметров текущего времени и даты, времени сна и момента пробуждения, параметров окружающей среды и т. п.

Роботизированная мобильная система здорового сна и пробуждения с электротехнической точки зрения включает в себя две отдельные подсистемы – подсистему контроля параметров окружающей среды и умного будильника и подсистему перемещения, построенную по принципу самобалансирующегося мобильного робота. Управление устройствами системы осуществляется от микроконтроллеров ATmega328P, установленных на плате Arduino Uno и Keystudio.

Электрическая принципиальная схема подсистемы здорового сна и пробуждения представлена на рисунке 1.

Подсистема контроля параметров окружающей среды и умного будильника включает в себя:

- управляющий микроконтроллер ATmega328P;
- DS1302, модуль часов реального времени с возможностью бесперебойного питания от литиевой батарейки.
- датчик влажности и температуры DHT11, цифровой датчик влажности и температуры, состоящий из термистора и емкостного датчика влажности. Также датчик содержит в себе АЦП для преобразования аналоговых значений влажности и температуры;

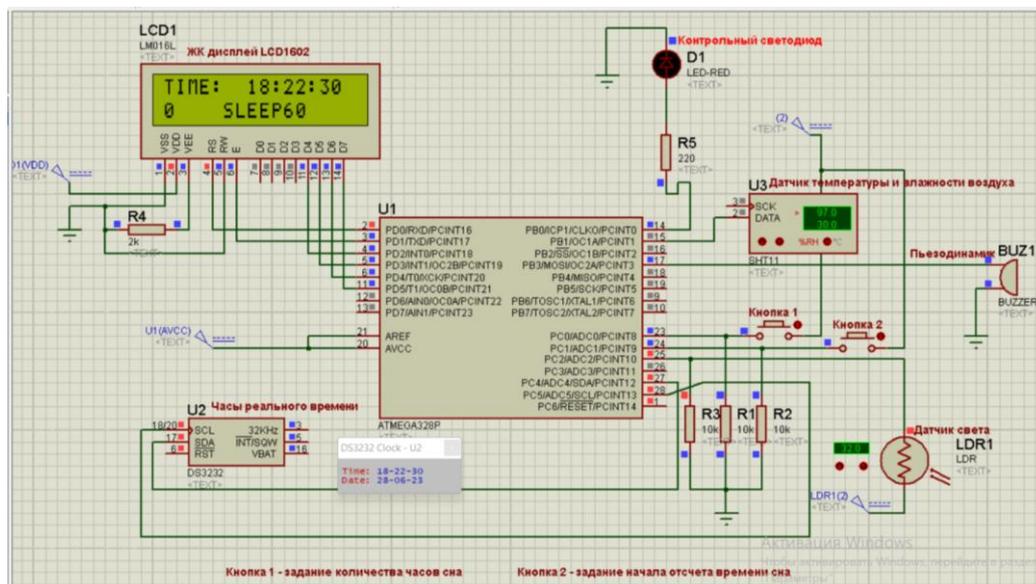


Рисунок 9 – Электрическая принципиальная схема устройства подсистемы контроля параметров окружающей среды и умного будильника

- фоторезистор;
- красный светодиод;
- тактовые кнопки;

- безопасную макетную плату;
- резисторы на 220Ом и 10кОм
- LCD-дисплей 1602А, электронный модуль, основанный на драйвере HD44780 от Hitachi. LCD1602, который имеет 16 контактов и может работать в 4-битном режиме (с использованием только 4 линии данных) или 8-битном режиме (с использованием всех 8 строк данных), также можно использовать интерфейс I2C.

- пьезоизлучатель звука НРА17А без собственного генератора частоты. Его характеристики: частота – 4 кГц, интенсивность – 78 дБ, номинальное рабочее напряжение – 5В.

Подсистема перемещения представляет собой самобалансирующуюся машину, собранную из компонентов робототехнического конструктора Ks0193 KeyeStudio.

В состав подсистемы входят микроконтроллер ATmega328P, плата расширения типа MotorShield, 2 двигателя постоянного тока TB6612FNG, модуль гироскопа и акселерометра MPU-6050, модуль беспроводной связи Bluetooth XBee, блок питания, элементы крепежа.

Алгоритм работы разрабатываемой системы предусматривает:

- отслеживание параметров окружающего воздуха и уровня естественного освещения в помещении для сна;

- расчет времени пробуждения пользователя и настройку будильника;

- движение мобильной части роботизированной системы.

Для расширения возможностей системы предусмотрено беспроводное управление по каналу Bluetooth, а также настройка времени сна и момента пробуждения, назначение которых осуществляется по нажатию кнопок (кнопка 1 и кнопка 2 на рисунке 9).

Индикация и звуковое сопровождение осуществляется с помощью светодиода красного цвета и активного пьезодинамика.

В алгоритм срабатывания будильника вводятся два параметра:

- желательное количество часов сна – 1;

- время отхода ко сну – 2.

1-й параметр вводится перед отходом ко сну из приложения Serial Port Terminal на телефоне через Bluetooth модуль, как переменная «Время сна» либо нажатием на кнопку 1 определенное количество раз.

2-й параметр – по нажатию кнопки 2 начинается отсчет времени сна, т. е. записывается значение в переменную «Начало сна».

Далее в программе рассчитывается 3 параметр – желательное время пробуждения, исходя из предложенной выше таблицы соответствий.

3-й параметр заносится в переменную «Время срабатывания будильника» и по нему будет включаться будильник (светодиод и пьезодинамик).

На ЖК-дисплей выводится текущее время, время сна и количество часов сна, заданное пользователем.

По одновременному нажатию на две кнопки выводятся параметры уровня освещенности помещения для сна, температуры и влажности окружающего воздуха.

Фазы медленного сна:

Первая фаза длится 15 минут, известна как дремота.

Вторая фаза длится 25 минут, происходит замедление работы внутренних органов.

Третья и четвертая фаза длятся около 40 минут, являются основной частью здорового сна.

В быстрой фазе организм полностью расслаблен, но начинается мозговая деятельность. Сновидения, увиденные на этой фазе, хорошо запоминаются.

Происходит учащение пульса, глазные яблоки активно двигаются.

Быстрая фаза занимает примерно 20 % всего времени отдыха.

Сон начинается с 1-й фазы медленного сна, доходит до 4-й, что занимает около 2 -х часов.

Это полный цикл, который должен повториться не менее 4-х раз.

Из этого следует, что нужно вставать утром через 8 часов с момента вступления в первую фазу.

Если человек привык ложиться в промежутке между 11–12 вечера, нужно вставать в 7–8 часов.

То время, которое человек проспал, при условии хорошего самочувствия утром, считается индивидуальной нормой. Пробуждение происходит в начальной медленной фазе, когда организм готов к бодрствованию, но еще не перешел в быструю фазу.

Если приходится вынужденно просыпаться в фазе медленного сна, будет ощущаться усталость, организм долго восстанавливает мышечную активность.

Есть теория, что люди, которых постоянно будит будильник на фазе медленного глубокого сна, склонны к различным нервно-психическим нарушениям. Используя знания о продолжительности каждой фазы, можно сократить время отдыха, просыпаться в определенный момент – на этапе, когда организм к этому готов.

Блок-схема алгоритма работы системы представлена на рисунке 2.

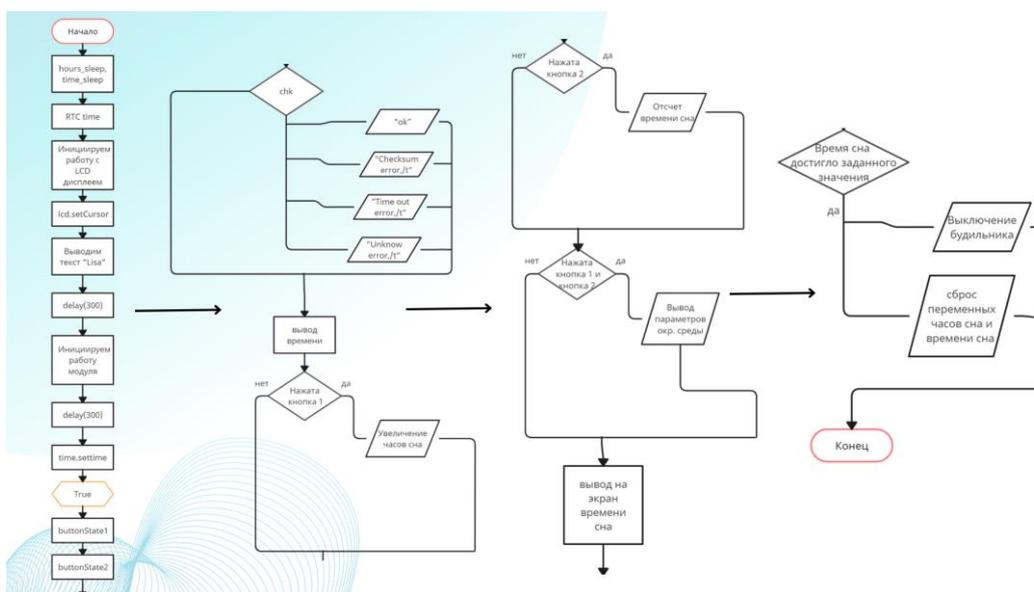


Рисунок 2 – Блок – схема алгоритма

Подсистема перемещения была построена на базе самобалансирующего робота, который использует мощность робота для поддержания относительного баланса, что представляет собой процесс динамического баланса. Для определения положения робота – балансира в проектируемой системе используются акселерометр и гироскоп. Сила для поддержания баланса робота исходит от движения колес, приводимых в движение двумя двигателями постоянного тока. Управление роботом – балансиром можно разделить на три задачи управления следующим образом:

1. Контроль баланса: удерживание робота в вертикальном положении и балансировании, контролируя вращение колеса автомобиля вперед и назад.
2. Контроль скорости: реализация переднего и заднего движения и контроль скорости с контролем наклона робота.
3. Управление направлением: реализация рулевого управления с контролем разницы в скорости вращения между двумя двигателями робота.

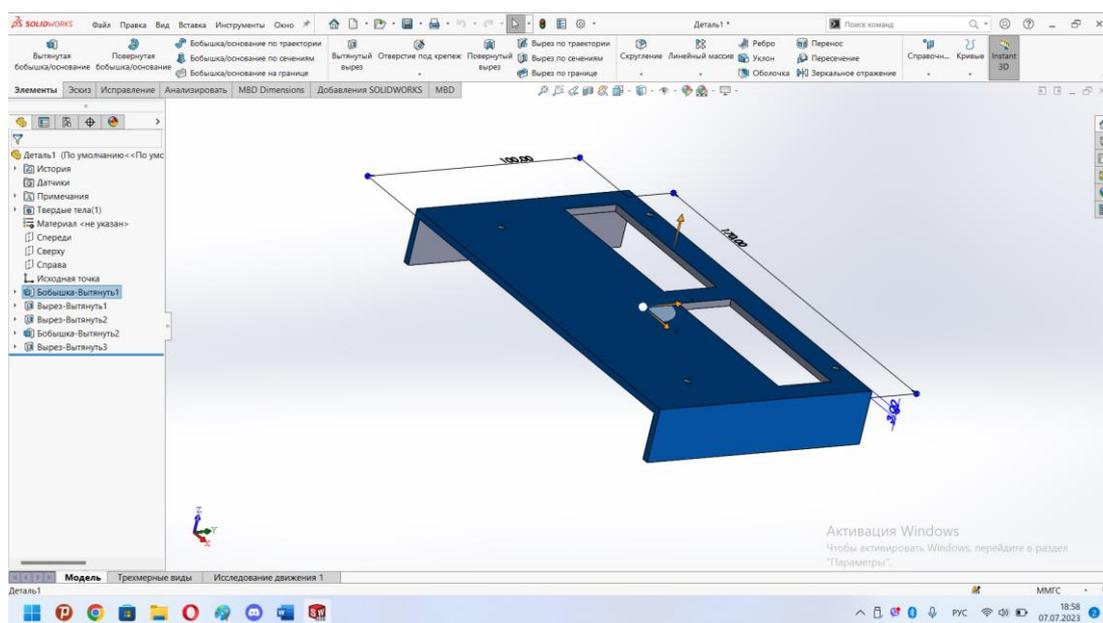
В процессе окончательного контроля все сводится к измерению контрольной величины.

Таким образом, между тремя задачами будет связь, которая будет мешать. Решение проблемы в том, чтобы контролировать баланс автомобиля; управление скоростью и направлением должно быть как можно более плавным.

Пропорциональное, интегральное и дифференциальное отклонение от задающего воздействия линейно комбинируются, чтобы сформировать контрольную величину, а затем управлять объектом с помощью этой контрольной величины. Такой регулятор называется ПИД-регулятором. В аналоговых системах управления наиболее распространенным законом управления для регуляторов является ПИД-регулирование.

Для создания корпусных деталей разрабатываемой системы использовалась система автоматизированного проектирования SolidWorks.

На рисунке 3 представлена модель корпуса для роботизированной системы здорового сна и пробуждения.



**Рисунок 3 – 3-D модель одной из корпусных деталей (крышка корпуса) разрабатываемой системы**

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Матрунчик, Ю. Н. Микропроцессорные системы управления. Лабораторный практикум [Электронный ресурс] – Минск : БНТУ, 2020. – 66 с. – Режим доступа: <https://rep.bntu.by/handle/data/70441?show=full>. – Дата доступа: 14.10.2023.
2. Матюшин, А. О. Программирование микроконтроллеров: стратегия и тактика / А. О. Матюшин. – М. : ДМК Пресс, 2017. – 355 с.

УДК 004

### **ОБОСНОВАНИЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НЕЙРОННОЙ СЕТИ YOLO ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОЛОЖЕНИЯ РАБОЧЕГО ИНСТРУМЕНТА 3D-ПРИНТЕРА**

**В. А. Мисякова, И. Л. Ковалева**

Белорусский национальный технический университет;  
г. Минск, Республика Беларусь

Одним из подходов, применяемым для оценки правильности позиционирования рабочего инструмента 3-D принтера, может быть сравнение заданных координат инструмента с реальными. В [1] для получения реальных координат инструмента используется веб-камера, установленная над рабочей зоной 3D-принтера. Для обработки сигнала, поступающего от камеры, разработана программа, в основу которой положены базовые алгоритмы компьютерного зрения. Тестирование программы показало удовлетворительные результаты. Для повышения точности определения положения рабочего инструмента в режиме реального времени предлагается использовать нейронную сеть YOLO, т. к. она показывает наилучшие результаты по точности и скорости детектирования объектов в режиме реально времени независимо от размеров объектов.

Большинство систем используют сверточные нейронные сети (CNN) несколько раз для обработки разных частей изображения, в то время как YOLO выполняет обработку всего изображения за один раз.

Нейронная сеть YOLO разбивает входное изображение на сетку размером  $S \times S$ . Если центр объекта находится внутри ячейки сетки (grid cell), эта ячейка сетки отвечает за обнаружение этого объекта. Каждая ячейка предсказывает ограничивающие рамки (bounding boxes) и показатели уверенности (confidence) для этих рамок (рисунок 1).

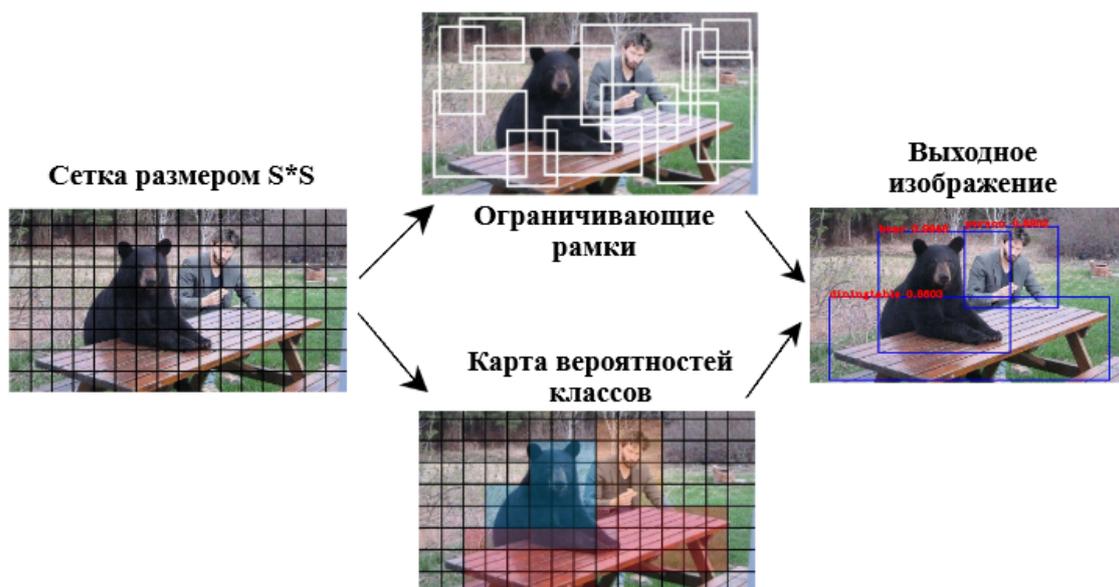


Рисунок 1 – Принцип работы YOLO

Для построения ограничивающих рамок используется алгоритм якорных рамок (anchor boxes). Якорные рамки – это предопределенные ограничивающие рамки различных размеров и соотношений сторон, которые используются моделью для предсказания положения и размеров объектов на изображении.

Каждая ограничивающая рамка представлена пятью параметрами-предсказаниями:  $x$ ,  $y$ ,  $w$ ,  $h$  и confidence. Координаты ( $x$ ,  $y$ ) представляют собой центр рамки относительно границ ячейки сетки. Ширина и высота предсказываются относительно всего изображения. Размерность и положение ограничительных рамок вокруг объекта на изображении (рисунок 2) вычисляются по формулам:

$$b_x = \sigma(t_x) + c_x, \quad (1)$$

$$b_y = \sigma(t_y) + c_y, \quad (2)$$

$$b_w = p_w e^{t_w}, \quad (3)$$

$$b_h = p_h e^{t_h}, \quad (4)$$

где  $t_x$ ,  $t_y$  – предсказанные смещения центра рамки относительно  $c_x$  и  $c_y$ ,  
 $t_w$ ,  $t_h$  – предсказанные смещения ширины и высоты рамки относительно параметров  $p_w$  и  $p_h$ ;

$p_w$ ,  $p_h$  - ширина и высота рамки;

$c_x$ ,  $c_y$  – смещение ячейки от верхнего левого угла изображения [2].

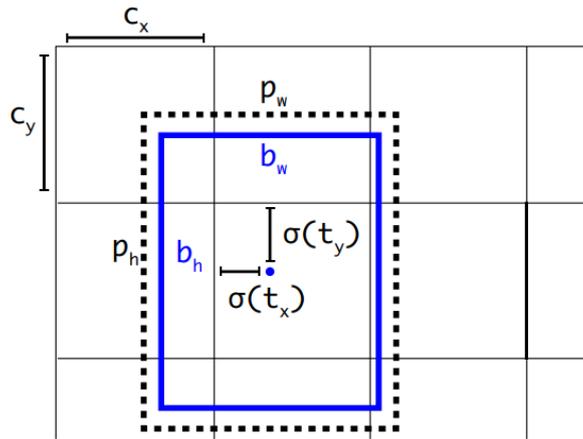


Рисунок 2 – Вычисление координат ограничивающей рамки

Уверенность (confidence) определяется как

$$confidence = Pr(Object) * IoU_{pred}^{truth}, \quad (5)$$

где  $Pr(Object)$  – вероятность наличия объекта в данной ячейке сетки,  $IoU_{pred}^{truth}$  измеряет степень перекрытия между предсказанной ограничивающей рамкой и истинной ограничивающей рамкой (ground truth), которая является эталоном.

IoU (рисунок 3) – это метрика, которая помогает оценить, насколько точно предсказанная рамка соответствует действительной позиции объекта.

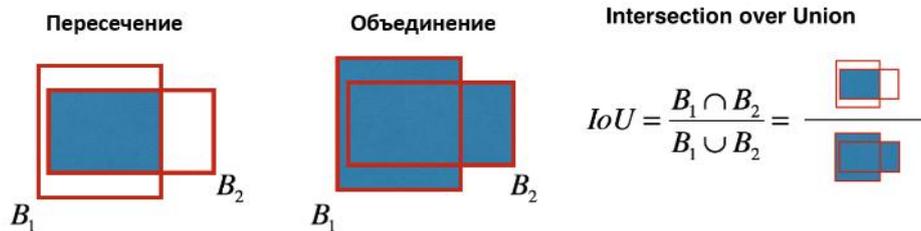


Рисунок 3 – Принцип расчета IoU метрики

Если в ячейке отсутствует объект, оценки уверенности должны быть равны нулю. В противном случае мы хотим, чтобы оценка уверенности соответствовала  $IoU_{pred}^{truth}$ .

После получения всех предсказанных ограничивающих рамок и соответствующих вероятностей для всех целевых объектов, требуется устранить повторы ограничивающих рамок для каждого объекта. Для этой задачи применяется метод подавления не-максимумов (Non-maximum suppression, NMS) [3]. Алгоритм выбирает ограничивающую рамку с наибольшей вероятностью принадлежности к объекту. Затем происходит проход по оставшимся рамкам. Если какая-либо из этих рамок имеет большое перекрытие IoU с рамкой, уже выбранной на предыдущем шаге, то она удаляется. Этот процесс повторяется для всех оставшихся рамок, пока не останется только наиболее вероятная и уникальная рамка для каждого объекта (рисунок 4).



Рисунок 4 – Результат использования метода NMS

Все версии нейронной сети YOLO обучены на наборе данных MS COCO, который включает в себя 80 классов объектов. Однако в YOLO существует возможность обучения на пользовательском пакете данных.

Так как для решения задачи необходимо отслеживать движение рабочего инструмента 3D-принтера в режиме реального времени, а также существует необходимость обучения нейронной сети на пользовательском наборе данных, предлагается использовать YOLOv4, основные сравнительные характеристики которой представлены на рисунке 5 [4].

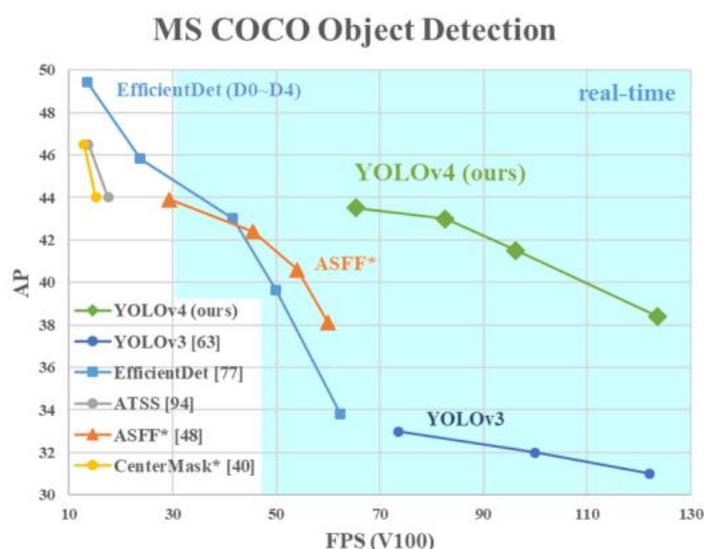


Рисунок 5 – Сравнение YOLOv4 и других детекторов объектов

Данная версия может работать с ограниченным объемом видеопамати и, как видно из рисунка 5, обеспечивает хорошую производительность по сравнению с другими нейронными сетями.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Мисякова, В. А. Основные этапы определения положения центра LED излучателя на изображении / В. А. Мисякова, Э. А. Азаревич, И. Л. Ковалева // Ин-

новационные технологии, автоматизация и мехатроника в машино- и приборостроении: материалы XI Международной научно-практической конференции / ред.кол.: А. Р. Околов (гл.ред.) [и др.] Минск : Бизнесофсет, 2023. – С. 107–109.

2. Redmon, J. YOLO9000: Better, Faster, Stronger [Electronic resource] / J. Redmon, A. Farhadi // IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2017. – Mod of access: <https://arxiv.org/pdf/1612.08242.pdf>. Date of access: 20.10.2023.

3. Ren, S. Faster r-cnn: Towards real-time object detection with region proposal networks [Electronic resource] / S. Ren [and all]: Computing Research Repository (CoRR), 2015. – Mod of access па: <https://arxiv.org/abs/1506.01497>. Date of access: 20.10.2023.

4. Bochkovski, A. YOLOv4: Optimal Speed and Accuracy of Object Detection [Электронный ресурс] / A. Bochkovski [and all]: Computing Research Repository (CoRR), 2020. – Режим доступа: <https://arxiv.org/pdf/2004.10934.pdf>, свободный. – Загл. с экрана. Яз. Англ. Дата доступа: 20.10.2023.

УДК 621.7.043

## **ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОГО ЦЕНТРА РОБОТА-МАНИПУЛЯТОРА В ПРОЦЕССЕ ИНКРЕМЕНТАЛЬНОГО ФОРМООБРАЗОВАНИЯ**

**Сазонникова Н.А., Илюхин В.Н., Петров И.Н., Косов Г.А., Азизов М.Э.**

Самарский Университет, Самара, Российская Федерация

В современных условиях при производстве изделий аэрокосмической техники возрастают требования к гибкости производства и возможности быстро реагировать на требования заказчика. Большие возможности открывают современные информационные технологии, реализуемые с помощью автоматизированных технологических комплексов. Одним из наиболее перспективных технологических процессов является инкрементальное формообразование с использованием промышленных роботов-манипуляторов. Такой подход позволяет отказаться от традиционной штамповой оснастки и оперативно переналаживать производство при освоении новых изделий. [1,2]. Вместе с тем, для успешного внедрения технологии инкрементального формообразования необходимо обеспечить требуемую точность выполнения размеров изделий. Современные роботы-манипуляторы характеризуются высокой повторяемостью перемещений, однако точность перемещений не всегда является достаточной. Решить эту проблему позволяет включение в состав автоматизированного комплекса лазерного трекера. Для повышения точности перемещений робота-манипулятора может проводиться его калибровка перед началом выполнения работы, а также применяется компенсация перемещений робота в процессе выполнения технологической операции [3,4,5].

Лазерный трекер представляет собой следящую триангуляционную измерительную систему, работающую в реальном масштабе времени [4-6]. Для обеспечения требуемой точности измерения необходимо выбрать схему измерений, отвечающую условиям данного технологического процесса и определить влияние параметров измерительной системы на результаты оценки перемещений робота.

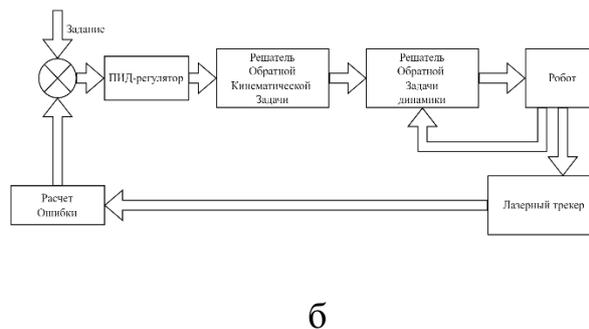
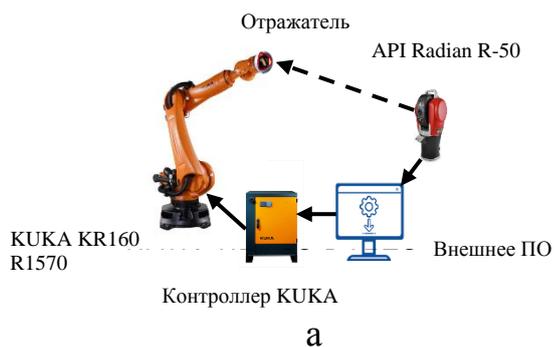
Так как технология калибровки промышленного робота не может учесть все факторы, приводящие к отклонению фактической траектории перемещения инструментального центра робота-манипулятора от заданной, целесообразным является включение лазерного трекера в состав автоматизированного технологического комплекса через систему обратной связи. Это позволяет проводить измерения фактического положения инструментального центра в реальном масштабе времени и сформировать корректирующий сигнал для компенсации отклонения инструментального центра робота от заданного положения. При этом достигаемая точность перемещений по результатам анализа зарубежных источников составляет 200 мкм, а их повторяемость – 100 мкм [7 -12]. В России публикации по данной тематике практически отсутствуют.

В работах [7,13, 14] показано, что компенсацию можно проводить при использовании как контроля по трем степеням свободы, так и шести. При этом удастся повысить точность выполнения технологической операции до 100 мкм. Во втором случае коррекция может осуществляться более плавно, но с меньшей частотой передачи данных от лазерного трекера к роботу-манипулятору. При этом отсутствует разработки систем компенсации в реальном времени отклонения от заданной траектории для процесса инкрементального формообразования.

Анализ существующих работ показал, что разработку системы компенсации отклонений инструментального центра робота-манипулятора от заданной траектории следует проводить с учетом индивидуальных особенностей технологического процесса: скорости перемещения по осям, кривизна траектории, направление приложения усилий инструмента. Процесс инкрементального формообразования характеризуется невысокими скоростями перемещения инструмента, траектории, как правило, являются криволинейными, а направление приложения усилия совпадает с осью пуансона.

Было проведено численное моделирование в программном пакете MATLAB системы компенсации отклонений инструментального центра от заданной траектории с учетом действующих усилий (рис.1 а и б). На систему оказывали влияние две случайные величины: неопределенность измерений лазерного трекера и стабильность повторяемости позиции робота манипулятора. Обе величины считались нормально распределенными в диапазонах, которые были взяты из паспортов устройств.

В ходе моделирования сначала были получены настроенные траектории для подбора ПИД-регулятора. Затем рассчитана ошибка позиционирования для линейных и криволинейных траекторий (рис. 2). Из результатов, полученных при проведении имитационного моделирования, следует, что компенсация дуговых траекторий более сложная задача, чем линейных, начальный заброс при компенсации по осям X и Y превышает исходную точность робота, так как величина компенсации по оси Y и Z зависит, от рассчитанной компенсации по оси X.

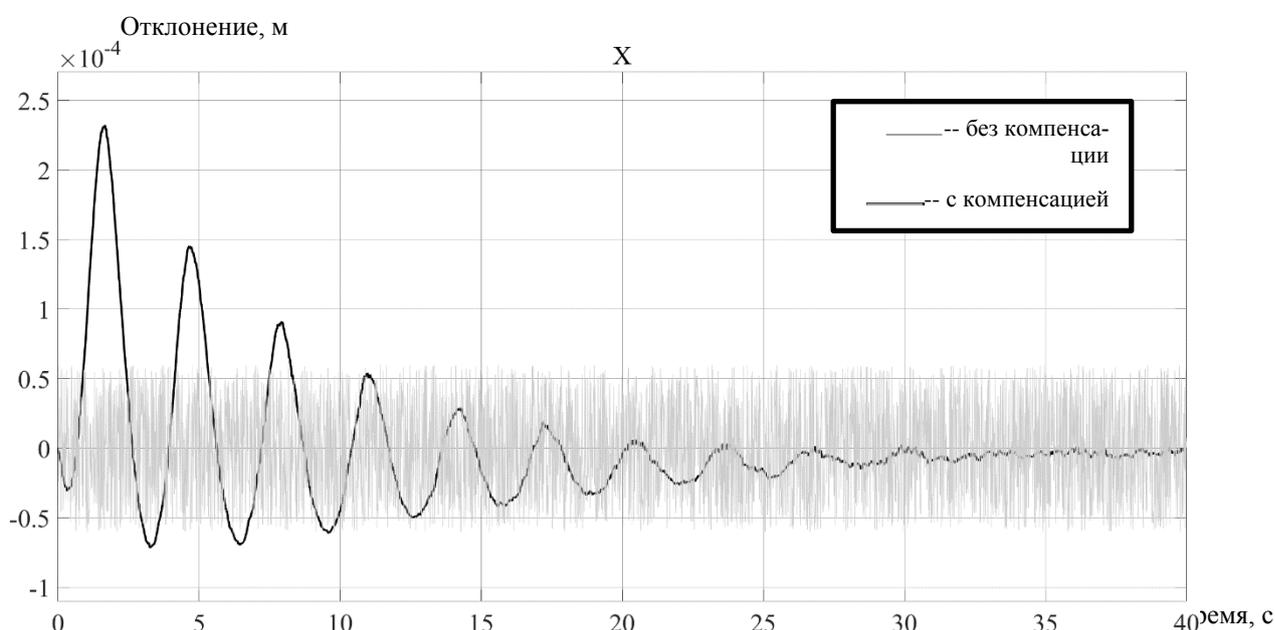


а - Основные элементы системы;

б- Схема системы управления

положением инструментального центра робота.

**Рисунок 1. Система компенсации отклонений инструментального центра робота-манипулятора в ходе выполнения технологической операции**



**Рисунок 2 - Сравнительное изображение ошибки позиционирования по оси X при прохождении тестовой дуговой траектории**

Это значит, что при компенсации ошибки по одной из осей, неотвратно будет корректироваться и компенсация по другим осям, что осложняет задачу регулирования, но по оси Z, где была введена статическая погрешность видны существенные улучшения, кроме того, установившаяся точность все равно оказывается лучше точности без компенсации. Поэтому можно предположить, что на практике при применении такого алгоритма следует закладывать в траекторию некоторое дополнительное расстояние сближения, при прохождении которого система управления придет в установившийся режим. В случае линейных траекторий максимальное отклонение позиции инструментального центра, обеспечиваемое системой управления в установившемся режиме работы, оказалась в пределах  $\pm 20$  мкм. Максимальная величина отклонения составила +15 мкм по верхней границе и -17 мкм по нижней. Максимальный период стабилизации системы управления был равен 10 с. В случае дуговых траекторий

максимальное отклонение позиции инструментального центра в установившемся режиме работы так же попало в пределы  $\pm 50$  мкм. Максимальная величина отклонения по верхней границе составила +16 мкм, по нижней границе -10 мкм. Максимальный период стабилизации системы был равен 40 с.

При проведении экспериментальных исследований по отработке системы компенсации отклонений инструментального центра робота-манипулятора от заданной траектории наиболее важными этапами работы являются: согласование систем координат лазерного трекера и робота, выбор программного пакета, используемого в качестве интерфейса для сопряжения лазерного трекера и робота-манипулятора, написание согласующей программы в Software Development Kit (SDK) в одном из программных пакетов, используемых для анализа результатов измерений лазерного трекера и формирования корректирующего сигнала. компенсация статической и динамической составляющих ошибки позиционирования. Общий вид экспериментальной установки показан на рис.3.



**Рисунок 3 – Общий вид экспериментальной установки для отработки системы компенсации отклонений инструментального центра робота-манипулятора от заданной траектории.**

На первом этапе осуществлялось экспериментальная отработка статической ошибки с использованием программного пакета LABVIEW. Осуществлялось перемещение по линейной траектории без приложения усилия, диапазон перемещений: линия 50 мм в плоскости XOY на высоте  $Z = 750$  мм с координатой  $Y = -790$ .  $X = (-200; -205)$ . Основные параметры эксперимента: скорость перемещения: 0,01 мм/с, частота обмена данными с лазерным трекером:  $\approx 10$  Гц, параметры фильтра нижних частот: 5 Гц, эксперимент проведен с трехкратным дублированием, отсчеты времени по шкале времени с интервалом 4 мс. Использовался пропорциональный регулятор с коэффициентом усиления 1. Статическая ошибка снизилась с 100 мкм до 60 мкм. При проведении эксперимента погрешность измерений не превышала  $\pm 15$  мкм. За счет подбора пропорционально-интегрального регулятора была выявлена область устойчивой работы системы компенсации отклонений. Однако, при работе по криволинейным тра-

екториям, запас устойчивости оказался невелик, особенно в тех точках окружности, где наблюдались максимальные радиальные биения.

На следующем этапе осуществлялась отработка программы на базе API\_SDK\_v4.7.20 для передачи данных с лазерного трекера к роботу-манипулятору. Сборка программы осуществлялась в Visual Studio 2022. Это позволило обеспечить частоту передачи данных до 250 Гц для работы системы коррекции и скорость выполнения технологической операции при работе по криволинейным и сложным траекториям до 30 мм/с.

Результаты выполнения тестовых траекторий показаны на рисунке 4.



Выполнение технологической операции при работе по криволинейной траектории

а



Выполнение технологической операции по сложной траектории

б

**Рисунок 4 – Выполнение тестовых траекторий**

Таким образом, разработана система компенсации отклонений инструментального центра робота манипулятора в процессе выполнения технологической операции инкрементального формообразования по криволинейным и сложным траекториям со скоростью перемещения до 30 мм/с и частоте передачи данных 250 Гц. Показана возможность выполнения обработки по криволинейным траекториям со скоростями, соответствующими условиям рассматриваемого технологического процесса при обеспечении точности обработки на уровне 50 мкм.

Результаты дальнейших исследований позволят создавать адаптивные системы управления качеством изготовления изделий аэрокосмической техники на базе промышленных роботов-манипуляторов и интеллектуальных измерительных систем с использованием лазерного трекера при выполнении технологических операций инкрементального формообразования изделий из металлических материалов, обработки композитных материалов и клепки.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. S. Arshad, A. Rashid, A. Melander. "Single point incremental forming. A study of Forming Parameters, Forming limits and Part accuracy of Aluminium 2024, 6061 and 7475 alloys." KTH Royal Institute of technology Stockholm, June 2012, 102p.
2. G. Medina - Sanchez, E. Torres – Jimenez, R. Lopez – Garcia, R. Dorado – Vicente, R. Cazalla – Moral. "Temperature influence on Single Incremental Forming of PVC parts." University of Jaen, Spain, 2017, pp.335–342.
3. L. Li, C. Zhao, C. Li, S. Qin. "End Position Detection of Industrial Robots Based on Laser Tracker." *Instrumentation Measure Métrologie*, Vol. 18, No. 5, October, 2019, pp. 459-464
4. X. Lua, T. Jiang. "Working pose measurement and quality evaluation of rotary drilling rig based on laser tracker." *Optik*, No. 187, 2019, pp. 311 - 317.
5. K. Kamali, A. Joubair, A. Bonev, P. Bigras. "Elasto-geometrical Calibration of an Industrial Robot under Multidirectional External Loads Using a Laser Tracker." *IEEE Trans Robotics*, Canada, 2016.
6. A. Nubiola, A. Bonev. "Absolute calibration of an ABB IRB1600 robot using a laser tracker." *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, No. 29(1), February 2013, pp.236-245.
7. C. Moeller, H. Schmidt, P. Koch, C. Boehlmann. "Real Time Pose Control of an Industrial Robotic System for Machining of Large Scale Components in Aerospace Industry Using Laser Tracker System" *SAE Int. J. Aerospace*, No. 10(2), September 2017, pp.134-145.
8. T. Kubela, A. Pochyly, V. Singule. "Assessment of Industrial Robots Accuracy in relation to Accuracy Improvement in Machining Processes." *IEEE PEMC*, September 2016, pp. 360-378.
9. Shi X., Zhang F., Qu X., Liu B. An online real-time path compensation system for industrial robots based on laser tracker, *International Journal of Advanced Robotic Systems*. – 2016. – V. 13(5).
10. Wang Z., Zhang R., Keogh P. Real-Time Laser Tracker Compensation of Robotic Drilling and Machining, *J. Manuf. Mater. Process.* – 2020. – V. 4. – P. 79.
11. Dung L.-T., Kang H.-J., Ro Y.-S. Robot manipulator modeling in Matlab-SimMechanics with PD control and online gravity compensation, *International Forum on Strategic Technology*. – 2010. – P. 446-449.
12. Asif, S.;Webb, P. Realtime Calibration of an Industrial Robot. *Appl. Syst. Innov.* **2022**, 5, 96. <https://doi.org/10.3390/asi5050096>
13. Mitchell R. Woodside\*, Joseph Fischer, Patrick Bazzoli, Douglas A. Bristow, Robert G. Landers . A Kinematic Error Controller for Real-Time Kinematic Error Correction of Industrial Robots *Procedia Manufacturing* 53 (2021) 705–715.
14. Wang Z., Zhang R., Keogh P. Real-Time Laser Tracker Compensation of Robotic Drilling and Machining, *J. Manuf. Mater. Process.* – 2020. – V. 4. – P. 79.

**НАДЕЖНОСТЬ, ДИАГНОСТИКА  
И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИЙ  
МАШИН. ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ  
В МАШИНОСТРОЕНИИ**

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ НА СТАДИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

**Горбунов В.П.<sup>1</sup>, Тюшкевич В.В.<sup>2</sup>**

- 1) Брестский государственный технический университет;  
г. Брест, Республика Беларусь
- 2) ООО «Машиностроительное предприятие «Компо»;  
г. Брест, Республика Беларусь

Современное технологическое оборудование должно обладать высокой надежностью работы, что обеспечивается рядом мер, применяемых на стадиях проектирования, изготовления, монтажа и эксплуатации оборудования. В этой связи, актуальным является решение проблемы прогнозирования технического ресурса машин и конструктивных элементов на стадии проектирования, для назначения обоснованного графика технического обслуживания (ТО) и времени межремонтного периода.

Целью данной работы является разработка рекомендаций по назначению графика технического обслуживания и ремонта технологического оборудования пищевых производств.

В качестве объекта исследования принят привод шприца вакуумного, двухвинтового для наполнения колбасных оболочек фаршем. Лимитирующим элементом конструкции для назначения времени технического обслуживания являются опорные втулки в решетке винтов вытеснителя, которые выполняют функцию подшипников скольжения и изготавливаются из композиционных материалов на основе фторопласта [1]. В процессе работы втулки подвергаются сильному износу и требуют замены при достижении предельного размера изношенной поверхности, согласно техническим условиям изготовителя  $\varnothing 20,2$  мм (начальный размер  $20^{+0,04}$  мм) [2]. Существующая система технического обслуживания шприца предусматривает принудительную замену втулок, что не всегда позволяет полностью использовать их ресурс. Назначение обоснованного оптимального ресурса позволит сократить количество и объем работ при ТО, сократит затраты на их проведение и увеличит производительность работы оборудования.

На этапе проектирования с целью выбора оптимальной конструкции узла или детали оборудования проводятся испытания в среде САПР. В этой связи создается виртуальная модель узла (детали), моделируются необходимые нагрузки, проверяется конструкция на жесткость, прочность, деформации.

В этой связи на начальном этапе исследования для анализа напряжений была создана трехмерная модель опорной втулки (рисунок 1), назначен материал - композиция фторопласта Ф4К15М5. Анализ проводился в среде САПР компьютерной программы Autodesk Inventor 2015. После назначения материала были заданы опоры детали. В нашем случае для шнека используется один вид опоры – защемление, так как наша опорная втулка вкручивается в решетку, которая неподвижно устанавливается в корпус вытеснителя шприца. При созда-

нии условий воздействия внешних сил на опорную втулку учитываем, что данная втулка является подшипником скольжения и опорой шнека (масса шнека составляет 8 кг). Один конец шнека находится в зацеплении с раздаточной коробкой, второй на опорной втулке [3], следовательно, нагрузка распределена на оба конца шнека. Однако в начале вращения шнека при подаче фарша в зону вытеснения, затем в зону наполнения фарша в оболочку происходит выравнивание шнека вдоль оси корпуса, то есть до запуска вся нагрузка была на одну сторону втулки, а во время работы стала равномерно распределяться по опорной поверхности втулки. Приложим радиальные нагрузки, создаваемые шейками шнеков, к центру опорной поверхности втулки. На рисунке 2 показан вектор силы, накладываемый на геометрию модели. Векторные компоненты меняют направление от положительного до отрицательного значения вдоль координаты  $Y$  и величину от минимального значения нагрузки в статике до максимального с учетом увеличения нагрузки при начале работы.

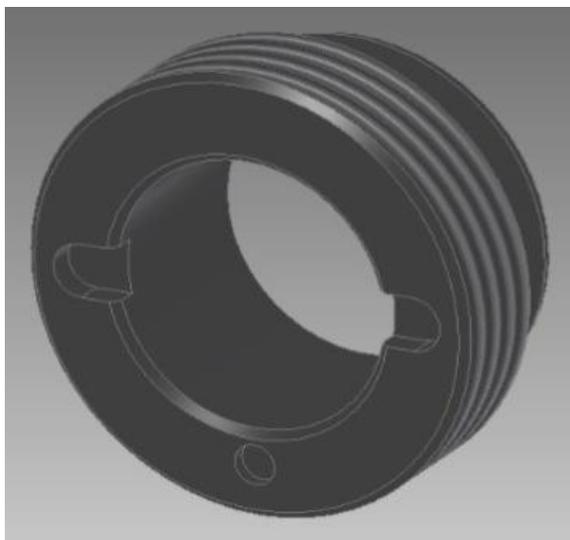


Рисунок 1 – Модель опорной втулки

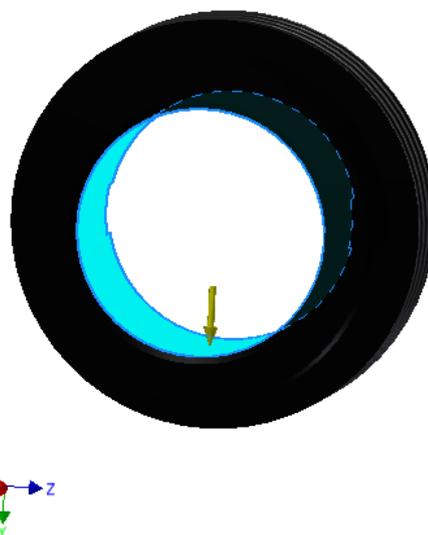


Рисунок 2 –Схема приложения нагрузки

Далее используем статистический анализ условий структурной нагрузки. Были рассмотрены напряжения в направлении осей координат  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ .

После создания сетки на модели для отображения относительно элементов геометрии был запущен процесс моделирования, в результате чего получены следующие результаты:

- напряжение по Мизесу;
- 1-е основное напряжение;
- 3-е основное напряжение;
- смещение;
- коэффициент запаса по прочности;
- напряжения, смещения и деформации по осям.

Полученные данные сохраняем в отчете программы. Данные по характерным параметрам напряжений предоставлены на рисунках 3-4. Полученные результаты расчетов показали, что деформации и соответствующие смещения в наибольшей степени проявляются в направлении координаты  $Y$ .

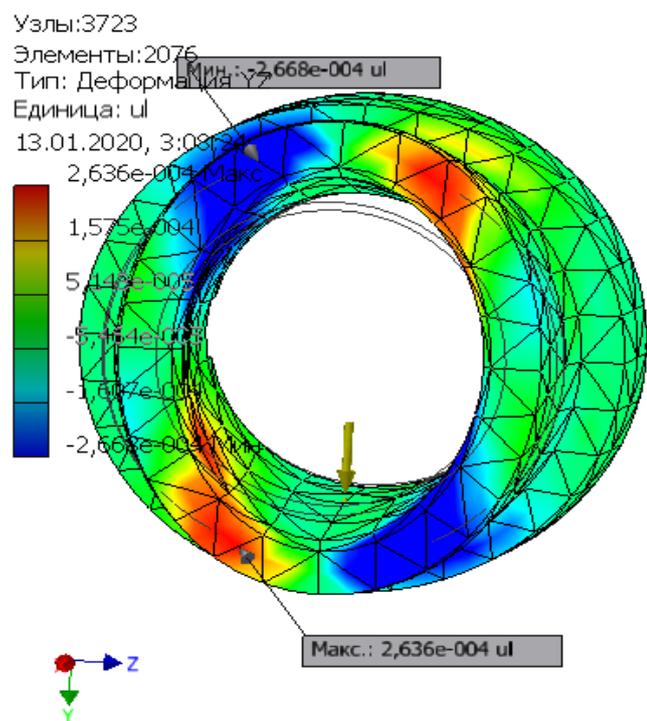
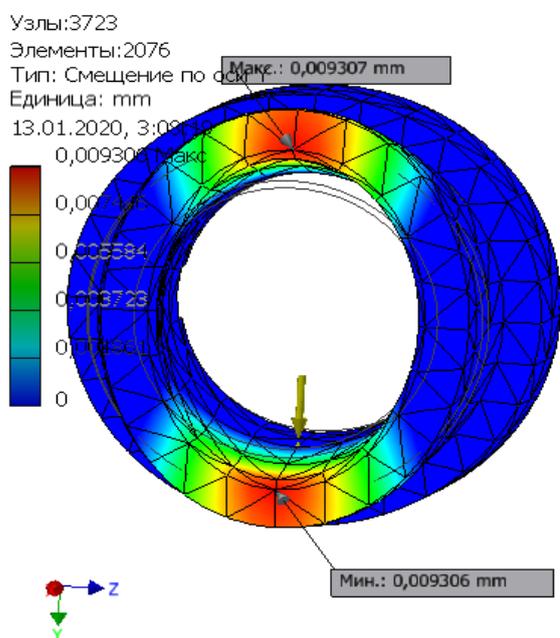
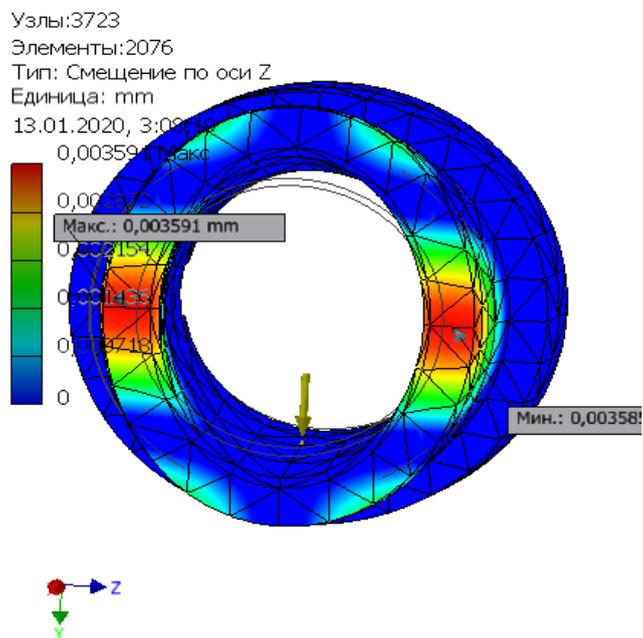


Рисунок 3 – Деформация втулки вдоль осей координат YZ



а)



б)

Рисунок 4 – Смещения вдоль осей координат : а - координата Z, б – координата Y

Результаты компьютерного анализа напряжений представлены в таблице.

<b>Наименование</b>	<b>Минимальная</b>	<b>Максимальная</b>
Объем	6736,59 мм <sup>3</sup>	
Масса	0,00641323 кг	
Напряжение по Мизесу	0,00788425 МПа	0,752817 МПа
1-ое основное напряжение	-0,42723 МПа	0,527324 МПа
3-е основное напряжение	-1,06362 МПа	0,209685 МПа
Смещение	0 мм	0,00945379 мм
Коэфф. запаса прочности	15 бр	15 бр
Напряжение XX	-0,649323 МПа	0,373117 МПа
Напряжение XY	-0,318701 МПа	0,301863 МПа
Напряжение XZ	-0,172224 МПа	0,172983 МПа
Напряжение YY	-0,877098 МПа	0,305186 МПа
Напряжение YZ	-0,174591 МПа	0,172489 МПа
Напряжение ZZ	-0,533299 МПа	0,448868 МПа
Смещение по оси X	-0,00137145 мм	0,0022625 мм
Смещение по оси Y	-0,00930722 мм	0,00930607 мм
Смещение по оси Z	-0,00358511 мм	0,00359056 мм
Эквивалентная деформация	0,00000810957 бр	0,000779119 бр
1-ая основная деформация	0,000000983971 бр	0,000497024 бр
3-я основная деформация	-0,000821677 бр	-0,00000324817 бр
Деформация XX	-0,000464846 бр	0,000392957 бр
Деформация XY	-0,000486973 бр	0,000461244 бр
Деформация XZ	-0,000263157 бр	0,000264317 бр
Деформация YY	-0,000727426 бр	0,00028662 бр
Деформация YZ	-0,000266773 бр	0,000263561 бр
Деформация ZZ	-0,000137011 бр	0,000497024 бр

Результаты моделирования показали, что размеры отверстия втулки при рассматриваемых условиях не выходят за допустимые значения, деформация и смещения вдоль осей координат не выходят за пределы допуска 0,2 мм.

Аналогично можно определить давление, максимальную величину удельного давления на выбранной грани (рабочей поверхности) в условиях равномерного или параболического распределения нагрузки.

При необходимости замены материала втулки, то есть использования более прочного, термо- и износостойкого материала моделирование повторяется после изменения параметра программы «Материал».

Сбор статистических данных, полученных в процессе эксплуатации, позволил определить исходные параметры для математического моделирования величины износа втулки [4], а также провести проверку данной модели на жизнеспособность. Так значения наработки до предельного состояния для опорных втулок определяется скоростью их изнашивания. Полученные статистические данные по результатам производственных испытаний показали, что при средней скорости изнашивания равной 0,00125 мм/час значение среднего срока службы данных втулок при допустимых величинах зазора составит, с учетом максимального смещения от максимальной нагрузки вдоль координаты Y, 160 часов. Данное значение может служить минимальной величиной ресурса, закладываемой в график технического обслуживания привода шприца.

**Выводы:** В результате моделирования получены изменения размеров опорной втулки под воздействием нагрузок, проведен анализ деформаций опорных втулок, смещения осей шнеков, что приводит к увеличению их биения. Используя априорную информацию по износостойкости рассматриваемых материалов втулки можно рекомендовать графики технического обслуживания шприцов исходя из режима их работы. Также даны рекомендации по использованию полученной информации для назначения технических требований к конструкции при проектировании и прогнозирования состояния данного оборудования в процессе эксплуатации

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Ивашов, В.И. Технологическое оборудование предприятий мясной промышленности: учеб. Пособие, в 2-х ч. Ч. 2 / Ивашов В.И. СПб: ГИОРД, 2003. – 464с.

2. Горбунов В.П., Тюшкевич В.В. Назначение оптимального ресурса технологического оборудования // Новые технологии и материалы, автоматизация производства: Сборник статей междунар. науч.-техн. конф. /г. Брест, (20-21 октября 2022 г.) – Брест, 2022. – С.57 – 61.

3. Горбунов В.П., Тюшкевич В.В. Ресурсные испытания технологического оборудования пищевой промышленности // Новые технологии и материалы, автоматизация производства: Сборник статей междунар. науч.-техн. конф. / г. Брест, (29-30 сентября 2021 г.) – Брест, 2021. – С.41 – 45.

4. Горбунов В.П., Тюшкевич В.В. Прогнозирования ресурса технологического оборудования в зависимости от скорости изнашивания // Новые технологии и материалы, автоматизация производства: Сборник статей междунар. науч.-техн. конф. /г. Брест, (29–30 сентября 2021 г.) – Брест, 2021. – С.45 – 49.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПАР ТРЕНИЯ В ПРОЦЕССЕ ФОРМИРОВАНИЯ РАВНОВЕСНОЙ ШЕРОХОВАТОСТИ

Акулич Я. А.

Брестский государственный технический университет  
г. Брест, Республика Беларусь

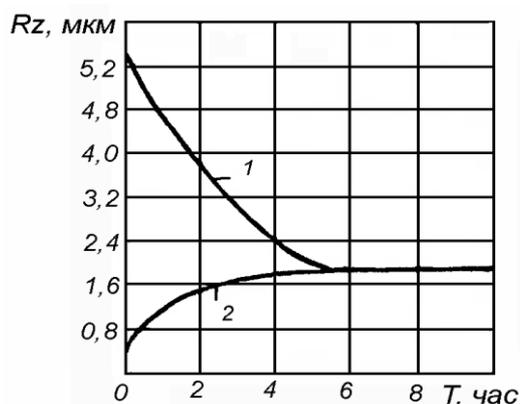
Большое внимание вопросу влияния характеристик микрогеометрии поверхности на приработку деталей машин уделено в работах И. В. Крагельского [1]. Так, первоначально в процессе приработки трущиеся поверхности контактируют по вершинам неровностей, в результате чего фактическая площадь контакта составляет малый процент от расчетной. Вследствие этого в местах фактического контакта по вершинам развиваются большие удельные давления, часто превышающие предел текучести трущихся металлов. Под действием данных давлений происходит пластическая деформация смятия неровностей, а при перемещении трущихся поверхностей относительно друг друга – деформация среза, вырывы и пластический сдвиг вершин неровностей, приводящие к интенсивному начальному износу.

В период приработки деталей, работающих в легких и средних условиях, высота неровностей уменьшается на 65–75 % при одновременном увеличении фактической поверхности их контакта. В это же время наблюдается процесс изменения размеров и формы неровностей. При этом высота неровностей уменьшается или увеличивается до определенного “оптимального значения”, различного для разных условий трения. Данная шероховатость будет являться оптимальной для данных условий трения и обеспечивать оптимальный износ пары трения. И. В. Крагельский подчеркивает, что она может быть как больше, так и меньше исходной (рисунок 1).

Для экспериментального исследования пар трения были выбраны образцы типа “вал-втулка”.

Образец, представляющий “вал” в паре трения, в качестве материала имеет легированную конструкционную сталь 40Х с последующей термообработкой до HRC 40...45, ГОСТ 4543-2016, а втулка пары трения была изготовлена из оловянистой бронзы БрОЦС 5-5-5 ГОСТ 613-79. Известно, что сочетание материалов антифрикционных пар трения сталь-бронза относится к наиболее благоприятным, так как коэффициенты трения скольжения для них не будут иметь высоких значений.

Для начальной серии экспериментальных исследований, цель которой заключалась в подборе оптимальных режимов при исследовании, были подготовлены вышеописанные образцы, заключительным методом обработки поверхностей трения которых являлось чистовое точение. При этом, параметр шероховатости поверхностей трения составлял  $Ra = 1,25$ .



1 – исходная шероховатость  $Rz = 5,4$  мкм; 2 – исходная шероховатость  $Rz = 0,5$  мкм

**Рисунок 1 – Изменение шероховатости поверхности трения после приработки, при разных величинах исходной шероховатости поверхности трения**

Во второй стадии экспериментальных исследований следовало принять во внимание необходимость определить трибологические характеристики пар трения, имеющих отличный исходный параметр шероховатости, полученный разными методами механической обработки. Таким образом, сопрягаемые поверхности образцов имели значения шероховатости, приведенные в таблице 1. Для подбора оптимальных значений шероховатости для исследования пар трения данного типа были использованы рекомендации источника [2].

**Таблица 1 – Средний параметр исходной шероховатости поверхностей трения образцов для исследования, полученных разными способами обработки**

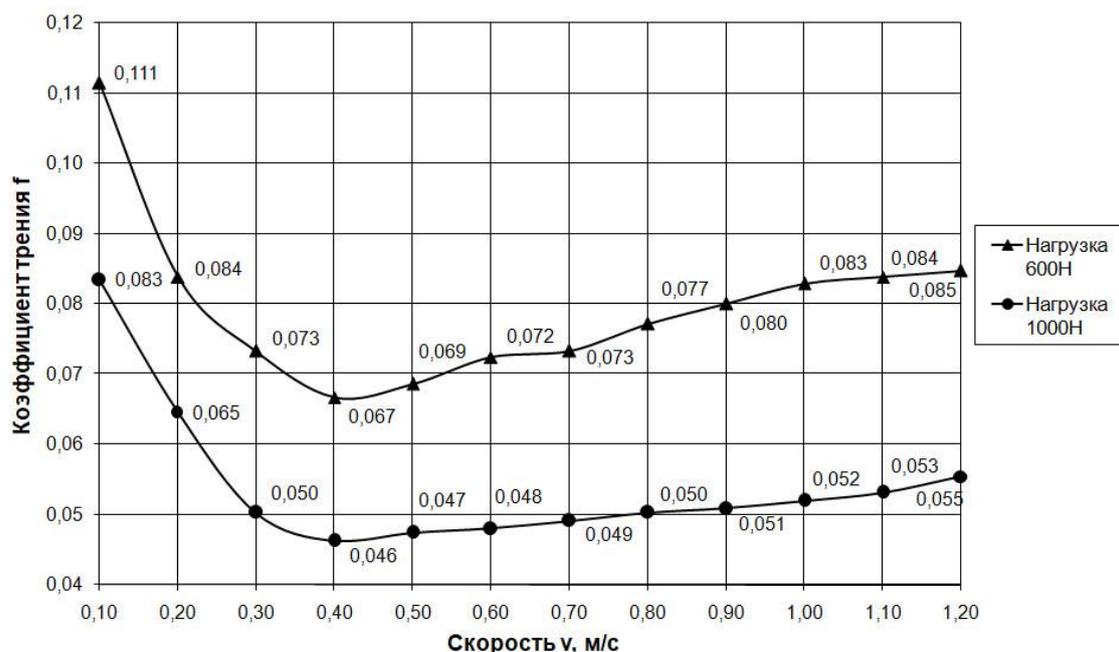
Метод механической обработки поверхности	Материал образца	Средний параметр исходной шероховатости, $Ra$
Точение	сталь 40Х	1,27
	бронза БрОЦС 5-5-5	1,31
Шлифование	сталь 40Х	0,24
	бронза БрОЦС 5-5-5	0,27

Размеры образцов, подвергнутых испытаниям на трение, соответствовали руководству по эксплуатации машины трения 2070 СМТ–1 [3]. Радиус рабочей поверхности образцов составлял  $R_{\text{раб.}} = 17,5$  мм.

Испытания проводились на машине трения указанной выше модели, имеющей камеру для испытаний образцов в жидкостной среде. В качестве смазочной среды было использовано масло И-40А, ГОСТ 20799-88, с кинематической вязкостью при  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$  –  $51\text{--}75$  мм<sup>2</sup>/с.

При проведении трибологических испытаний была реализована прямая пара трения, с соблюдением следующих условий: вращение передавалось на образец с большими площадью и твердостью исходной структуры поверхностного материала, а нагрузка была приложена через неподвижный образец.

Для подбора оптимальных режимов для исследования пар трения были определены зависимости коэффициента трения от скорости скольжения. Зависимость коэффициента трения  $f$  от скорости скольжения  $V$ , при фиксированных величинах нагружения, представлена на рисунке 2.



**Рисунок 2 – Зависимость значений коэффициента трения от скорости скольжения при заданных режимах нагружения 600Н и 1000Н**

Рассматривая данные зависимости, следует указать на влияние смазочного материала, образующего граничный слой трения, на коэффициент трения в области низких значений скорости скольжения. Так как исследования проходили в присутствии смазочной среды, наблюдается характерное уменьшение коэффициента трения при увеличении скорости скольжения. В данном случае уменьшение коэффициента трения можно объяснить сокращением времени существования фрикционных связей и уменьшением площади, числа и пятен контакта. Важное значение в данном случае имеет уменьшение вероятности разрушения граничного слоя.

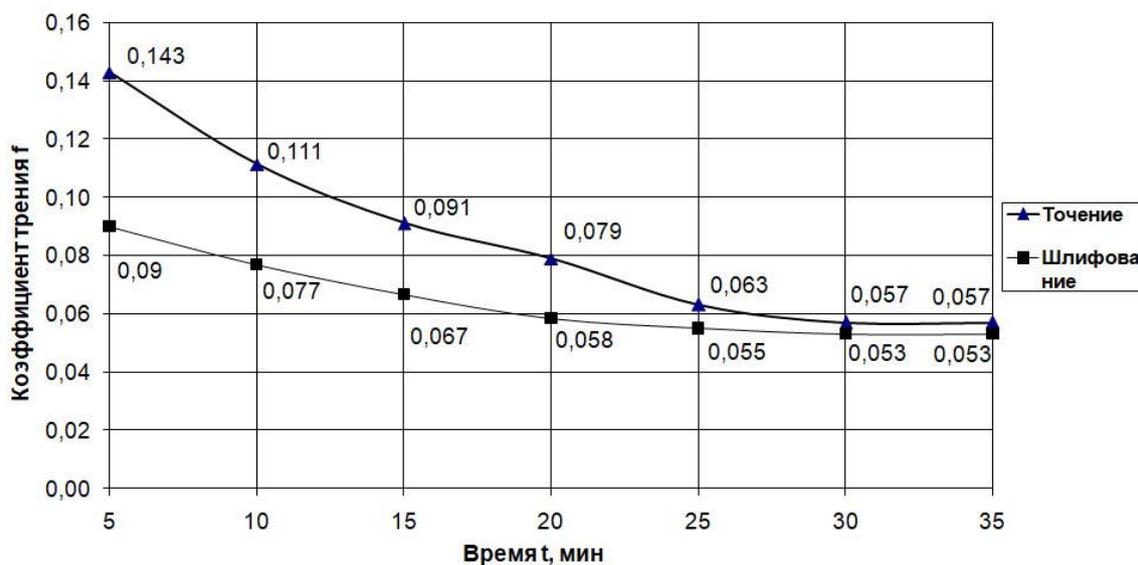
Как видно на диаграмме, при невысоких скоростях скольжения, до значений  $V = 0,3 \dots 0,4$  м/с, время контакта микронеровностей поверхности достаточно для разрушения граничного слоя под действием нагрузки.

Для каждого значения прикладываемой к паре трения нагрузки существует область значений, в которой коэффициент трения минимален, несмотря на увеличение скорости скольжения. Так, минимальные показатели коэффициента трения можно наблюдать при значениях скорости скольжения в диапазоне  $V = 0,4 \dots 0,5$  м/с.

При дальнейшем повышении скорости скольжения до значений  $V = 0,8 \dots 1,2$  м/с, на увеличение коэффициента трения также может оказывать влияние температура в зоне трения. В результате увеличения температуры происходит смещение, а на отдельных участках и разрушение граничных слоев, что может привести к локальному схватыванию поверхностей взаимодействующих тел.

Также следует отметить более низкие значения коэффициента трения при более высоких показателях нагружения пары трения. Вместе с тем, очевидно, что увеличение скорости скольжения при более высоком значении нагрузки не приводит к изменению характера зависимости  $f(v)$ .

При исследовании пар трения, имеющих разную исходную шероховатость, полученную отличными методами механической обработки, были получены следующие результаты. Так, динамика изменения величины коэффициента трения от времени испытания представлены на рисунке 3.



**Рисунок 3 – Зависимость коэффициента трения от времени испытания пар трения с разной исходной шероховатостью**

Рассматривая приведенные зависимости, можно отметить, что через 25–30 минут после начала испытаний наблюдались стабильные значения коэффициента трения, что может говорить о переходе исследуемой пары трения в равновесное динамическое состояние.

Диаграммы показывают, что процесс приработки поверхностей пар трения обработанных шлифованием проходит быстрее. Отметим также более низкие значения коэффициента трения и температуры среды для данной пары трения. Очевидно, что время приработки, сопровождаемое интенсивным изнашиванием сопряженных поверхностей будет зависеть от того, насколько исходные параметры шероховатости будут близки к эксплуатационным. Сформировавшееся в результате приработки равновесная шероховатость, как и другие параметры поверхностного слоя контактирующих деталей, будет зависеть от метода исходной механической обработки поверхности.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Крагельский И. В. Основы расчетов на трение и износ / И. В. Крагельский, М. Н. Добычин, В. С. Комбалов. – М. : Машиностроение, 1977. – 526 с.
2. Суслов, А. Г. Качество поверхностного слоя деталей машин / А. Г. Суслов – М. : Машиностроение, 2000. – 320 с.
3. Машина для испытания материалов на трение и износ 2070 СМТ-1 / Техническое описание и инструкция по эксплуатации 2.779.013-01 ТО. – М. : МЗИО, 1981. – 69 с.

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МОДЕЛЕЙ ВЗАИМОСВЯЗИ КОЭФФИЦИЕНТОВ ТРЕНИЯ ЗИБЕЛЯ И КУЛОНА

**В. Г. Барсуков<sup>1</sup>, В. В. Воропаев<sup>1</sup>, Е. Т. Воропаева<sup>1</sup>, В. М. Голуб<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Гродненский государственный университет имени Янки Купалы, г. Гродно, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Брестский государственный технический университет, г. Брест, Республика Беларусь

Трение играет существенную роль не только в механике машин и механизмов, но также и при обработке давлением твердых и дисперсных материалов. В последнем случае оно определяет силовые и энергетические параметры процессов деформирования, неоднородность напряженно-деформированного состояния и влияет на неравномерность распределения показателей физико-механических свойств получаемых изделий. Несмотря на важность проблемы трения, многие ее аспекты изучены недостаточно. Это обусловлено сложностью протекающих в зоне фрикционного контакта явлений, что затрудняет возможность ведения триботехнических или триботехнологических расчетов. Например, широко применяемый закон трения Амонтона – Кулона устанавливает линейную зависимость удельных сил трения  $\tau$  от давления  $p$  в зоне контакта [1,2]

$$\tau = fp, \quad (1)$$

где  $f$  – коэффициент трения, называемый в дальнейшем коэффициентом трения Кулона.

Вместе с тем, имеющиеся экспериментальные данные по полимерным материалам и металлам [3,4] свидетельствуют о существенном снижении коэффициента трения Кулона с ростом давления. Кроме того, закон трения Амонтона – Кулона допускает неограниченный рост удельных сил трения в зоне контакта, в то время как классические положения теории пластичности ограничивают эту величину сдвиговой прочностью  $\tau_s$  деформируемого материала

$$\tau = \tau_s = \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}}, \quad (2)$$

где  $\sigma_s$  – предел текучести деформируемого материала.

Более тщательный анализ, выполненный Зибелем при изучении процессов объемной штамповки металлов, показал [3], что при высоких давлениях удельные силы трения составляют некоторую долю от сдвиговой прочности  $\tau_s$  деформируемого материала

$$\tau = m\tau_s, \quad (3)$$

где  $m$  – так называемый «фактор трения» Зибеля [3,4].

Переходя от сдвиговой прочности  $\tau_s$  к пределу текучести  $\sigma_s$ , формула (3) с учетом (2) может быть преобразована к следующему виду

$$\tau = \frac{m}{\sqrt{3}}\sigma_s = \mu_s\sigma_s, \quad (4)$$

где  $\mu_s$  – коэффициент пластического трения Зибеля, рассчитываемый по формуле

$$\mu_s = \frac{m}{\sqrt{3}} \approx 0,577m. \quad (4a)$$

Кроме рассмотренных выше простейших схем предложены и более сложные аналитические зависимости, связывающие удельные силы трения с контактным давлением. Например, в работе [4] применительно к прессованию древесно-полимерных композитов получено следующее уравнение для расчета удельных сил трения:

$$\tau = \mu_s \sigma_s \left( 1 - e^{-\frac{fp}{\mu_s \sigma_s}} \right). \quad (5)$$

Применительно к обработке металлов давлением Левановым предложена аналитическая зависимость [3]

$$\tau = m\tau_s \left( 1 - e^{-\frac{1,25p}{\sigma_s}} \right) = \frac{\mu_s \sigma_s}{\sqrt{3}} \left( 1 - e^{-\frac{1,25p}{\sigma_s}} \right). \quad (6)$$

Приведенные выше зависимости (5) и (6) теоретически могли бы быть использованы в широком диапазоне рабочих давлений, поскольку они удовлетворяют закону трения Зибеля при высоких давлениях ( $p \rightarrow \infty$ ) и согласуются с законом трения Амонтона – Кулона при низких давлениях ( $p \rightarrow 0$ ). Вместе с тем не ясно, в какой мере коэффициент (или фактор) трения Зибеля связан с коэффициентом трения Кулона. К тому же имеется противоречие законов трения Амонтона – Кулона (линейная зависимость удельных сил трения от давления) и Зибеля (независимость удельных сил трения от давления) в процессах пластического деформирования.

Проанализируем возможность устранения этого противоречия с использованием адгезионной теории трения, которая основана на выдвинутом Ф. П. Боуденом и Д. Тейбором положении о том, что вступающие в контакт неровности образуют «мостики сварки» благодаря адгезии на пятнах контакта [1]. В зависимости от свойств контактирующих материалов срез «мостиков сварки» может происходить по границе раздела неровностей или по более мягкому материалу. С увеличением нормальной нагрузки растут пластическая деформация контактирующих выступов и сближение тел трения. В результате увеличиваются размеры и число «мостиков сварки», что сопровождается ростом силы трения  $F_T$ . Следовательно, сила трения растет пропорционально площади фактического контакта (ФПК) и определяется произведением удельных сил адгезионного сцепления  $\tau_a$  на величину  $A_r$  ФПК [1]:

$$F_T = \tau_a \cdot A_r = \tau_a \cdot \eta \cdot A_n, \quad (7)$$

где  $\eta = A_r / A_n$  – относительная ФПК;  $A_n$  – номинальная площадь касания.

Откуда для удельных сил трения  $\tau$  можно записать

$$\tau = \frac{F_T}{A_n} = \tau_a \cdot \eta. \quad (8)$$

При использовании формулы (8) необходимо знать закон изменения относительной ФПК  $\eta$  как функции прикладываемого давления  $p$ . В простейшем случае, для малых пластических деформаций, зависимость ФПК от давления  $p$  имеет линейный характер [4]:

$$\eta = \frac{p}{c\sigma_s}, \quad (9)$$

где  $c \approx 3$  – коэффициент.

Приняв, что на ФПК выполняется закон трения Зибеля в форме (4), из аналитической зависимости (9) получаем

$$\tau = \frac{F_T}{A_n} = \frac{\mu_s}{c} p. \quad (10)$$

В формуле (10) удельные силы трения  $\tau$  прямо пропорциональны прикладываемому давлению  $p$ . Таким образом, при малых пластических деформациях, когда ФПК мала в сравнении с номинальной, из закона трения Зибеля на микроплощадках следует закон трения Кулона на макроплощадках. Такой подход может описывать начальную стадию процесса нагружения.

В более общей теоретической постановке вопрос взаимосвязи ФПК и действующих давлений при пластическом деформировании материала с шероховатой поверхностью рассмотрен Е. М. Макушком [5]. Взаимное влияние деформируемых неровностей при течении приводит для шаровых неровностей к следующему решению:

$$p = \beta\sigma_s \ln \frac{A_n}{A_n - A_r}, \quad (11)$$

где  $\beta = 1,15$  – коэффициент, учитывающий объемный характер нагружения.

Решив уравнение (11) относительно отношения  $A_r/A_n$ , получаем

$$\frac{A_r}{A_n} = 1 - \exp\left(-\frac{p}{\beta\sigma_s}\right). \quad (12)$$

Подстановка (12) в (8) приводит к следующей функции, связывающей удельные силы трения  $\tau$  с контактным давлением  $p$ :

$$\tau = \mu_s \sigma_s \left(1 - \exp\left(-\frac{p}{\beta\sigma_s}\right)\right). \quad (13)$$

Уравнения (12) и (13) показывают стремление к насыщению контактных поверхностей ( $A_r/A_n \rightarrow 1$  при  $p \rightarrow \infty$  и приближению удельных сил трения к некоторым предельным значениям ( $\mu_s \sigma_s$ ).

Проанализируем взаимосвязь коэффициента  $\mu_s$  (или фактора  $m$ ) трения Зибеля с коэффициентом трения  $f$  Кулона.

В формуле (10) удельные силы трения  $\tau$  прямо пропорциональны прикладываемому давлению  $p$ . Соответственно, коэффициент трения Кулона  $f$  связан с коэффициентом пластического трения Зибеля  $\mu_s$  следующей зависимостью

$$f = \frac{\mu_s}{c}. \quad (14)$$

Поскольку  $c \approx 3$  [4], то из формулы (14) с учетом (3) следует, что коэффициент пластического трения Зибеля  $\mu_s$  в три раза больше коэффициента трения Кулона  $f$ , а максимальное значение коэффициента трения Кулона  $f$  составляет треть от максимального значения  $\mu$ , т. е. около  $f_{max} = 0,19$  для всех видов контактирующих материалов. Этот вывод близок к имеющимся экспериментальным данным для сухого трения металлов по стали. Вместе с тем, формула (9) является приближенной, поскольку она получена в предположении об идеальном пластическом контакте без учета стадий упругого и стесненного упруго-пластического деформирования, а также взаимного влияния микронеровностей при пластическом деформировании.

Формулы (6) и (13) также позволяют оценивать в первом приближении возможное значение коэффициента трения Кулона  $f$  для начальной стадии деформирования, когда контактное давление мало. Так, разложив функцию (13) в ряд Маклорена с удержанием линейных слагаемых от  $p$ , после преобразований получаем

$$\tau \approx \frac{\mu_s}{\beta} p. \quad (15)$$

Коэффициент  $\mu_s/\beta$  перед  $p$  представляют собой по физическому смыслу коэффициент трения Кулона  $f$ . Рассуждая аналогично, из формулы Леванова (6) путем разложения ее в ряд Маклорена и удержания линейных членов можно записать

$$\tau \approx \frac{m}{\sqrt{3}} \cdot 1,25 p = 1,25 \mu_s p. \quad (16)$$

Коэффициент трения Кулона, на основании (16), будет

$$f = 1,25 \frac{m}{\sqrt{3}} = 1,25 \mu_s. \quad (17)$$

Недостатком приведенных выше формул (15) и (17) являются существенные завышенные расчетные значения коэффициента трения Кулона, что видно из простейших оценочных расчетов при значении коэффициента  $\mu_s$  в реализуемом на практике диапазоне  $\mu_s = 0,45 - 0,577$ .

### **Заключение.**

Результаты выполненных исследований позволили осуществить теоретическое обоснование взаимосвязи коэффициентов трения Зибеля и Кулона на основе адгезионной теории трения и моделей пластического деформирования шероховатых поверхностей. При этом модель идеального пластического контакта дает расчетные значения, приближающиеся к экспериментальным. Для повышения точности расчетов необходимо разрабатывать более строгие модели,

учитывающие особенности стесненного упругопластического деформирования на начальной стадии нагружения. Результаты исследований могут быть использованы в учебном процессе при изучении триботехнических дисциплин, а также в инженерной и научно-исследовательской практике.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Боуден, Ф. П. Трение и смазка твердых тел. / Ф. П. Боуден, Д. Тейлор; пер. с англ. Н. М. Михина и А. А. Силина; Под ред. И. В. Крагельского. – М. : Машиностроение, 1968. – 544 с.
2. Свириденко, А. И. Механика дискретного фрикционного контакта / А. И. Свириденко, С. А. Чижик, М. И. Петроковец – Минск : Наука и техника, 1990. – 272 с.
3. Леванов, А. Н. Контактное трение в процессах обработки металлов давлением / А. Н. Леванов [и др.]. – М. : Metallurgia, 1975. – 416 с.
4. Барсуков, В. Г. Трибомеханика дисперсных материалов. Технологические приложения / В. Г. Барсуков, Б. Крунич. – Гродно: - ГРГУ, 2004. – 240 с.
5. Макушок, Е. М. Механика трения / Е. М. Макушок – Минск : Наука и техника, 1974. – 256 с.

УДК 621

#### **ДИАГНОСТИКА СТАРЕНИЯ МОТОРНЫХ МАСЕЛ С ПОМОЩЬЮ КАПЕЛЬНОГО ТЕСТА (МЕТОД VLOTTER SPOT)**

**В. М. Голуб<sup>1</sup>, Д. В. Теслюк<sup>1</sup>, В. В. Колодич<sup>2</sup>, Ю .А. Добрияник<sup>2</sup>,  
А.В. Мартынов<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Брестский государственный технический университет, г. Брест,  
Республика Беларусь

<sup>2</sup>ОАО «ЦВЕТОТРОН», г. Брест, Республика Беларусь

Качество смазывающего материала имеет колоссальное значение в любой отрасли машиностроения. Моторное масло защищает детали двигателя от износа и обеспечивает слаженную работу механизмов, смазывая рабочие узлы и снижая силу трения между сопряженными элементами. Также оно охлаждает мотор и очищает его от продуктов сгорания топлива.

Моторное масло, изготовленное из непригодного и дешевого сырья или с допущением других нарушений, не только хуже выполняет свои функции, но и наносит вред двигателю. Оно сокращает срок эксплуатации механизмов и может привести к поломке и их последующему дорогостоящему восстановлению.

Сейчас некачественное и поддельное или, как его еще называют, контрафактное моторное масло выпускается в огромных количествах. От подделок страдают не только потребители, но и сами производители смазочных материалов, теряющие свою прибыль.

Определить подделку, а также проконтролировать состояние жидкости – узнать, нуждается ли она в замене, помогает капельный тест на бумаге.

Одним из наиболее распространенных и простых методов определения этих показателей является метод «капельной пробы», заключающийся в нанесении капли работающего масла на фильтровальную (индикаторную) бумагу и последующем анализе полученного масляного пятна. При впитывании капли масла в индикаторную бумагу наблюдается открытый в 1903 русским ученым М. С. Цветом хроматографический эффект, а точнее – его разновидность, относящаяся к технологии распределительной хроматографии. За исследования в области распределительной хроматографии, описанной в 1944 г., американские ученые Мартин и Сендж получили Нобелевскую премию. Именно эта технология и используется в экспресс-тестах компании MOTORcheckUP. Сам метод «капельной пробы» был разработан компаний Shell в 1948 г. непосредственно для оценки качества моторного масла и назван Blotter Spot. С помощью капельного теста можно не только определить качество моторного масла, но и проверить следующие параметры:

- состояние резиновых прокладок и уплотнителей в двигателе;
- свойства моторного масла;
- состояние двигателя в целом (в частности, нуждается ли он в капитальном ремонте);
- определить, когда нужно поменять масло в моторе машины.

#### **Методика проверки качества масла**

1. Для начала моторное масло следует прогреть до рабочей температуры, заглушить двигатель, дать остыть минуты три-пять, чтобы масло стекло в поддон и взять его на щуп из поддона.

2. Одну каплю масла необходимо капнуть на бумагу (плотность 80 г/м<sup>2</sup>). Лучше всего использовать для корректности исследования чистый белый лист. Через 20 минут смазка хорошо впитается в него, образуя соответствующее пятно (необходимо дать листу бумаги высохнуть минимум часа 3, а то и сутки при комнатной температуре). Лист бумаги нужно положить на непитающее основание (пластик, стекло). Цвет и геометрические характеристики масляного пятна могут предоставить достаточно много различной информации о масле.

3. Измеряем линейкой диаметры зон (два диаметра) и считаем коэффициенты моюще-диспергирующих свойства моторного масла двумя способами – определение  $k_{ДС}$  (ДС) и  $k_{МД}$  (методика Пасечникова Н. С., Хмелевой Н. М) и коэффициент механических примесей  $k_{МПР}$  (та же методика):

$$k_{ДС} (ДС) = 1 - d^2/D^2, k_{МД} = D/d, k_{МПР} = d_1/d,$$

где  $d$  – диаметр окружности кольца,  $D$  – диаметр окружности зоны диффузии,  $d_1$  – диаметр окружности центра капли.

После чего проводим визуальную оценку состояния пятна капли масла с эталоном (специальной фототаблицей), а также рассчитываем все коэффициенты. Полученная величина является численным показателем диспергирующей

способности работающего масла и выражается в условных единицах. Нормальным показателем принято считать  $k_{ДС} = 0,5...1$ . Рекомендуется более частое проведение расчетов капельной пробы масла при достижении значения  $k_{ДС} = 0,6...0,65$  усл. ед. Коэффициент  $k_{ДС} \leq 0,3$  – считается аварийным. Для  $k_{МД}$  граничным считается значение 1,65. Если расчетное значение получилось ниже этой границы, то вполне вероятно образование в двигателе лаковых отложений. Для коэффициента механических примесей в масле  $k_{МПП}$  граничным считается значение 0,44. Если расчетное значение получилось ниже этой границы, то вероятно образование задиров на стенках цилиндров.

Для проверки выбрали масло Gazpromneft Super 10W40. Была поставлена задача изучить пробы, полученные на бумаге, рассчитать коэффициенты и сделать выводы о его дальнейшем применении.

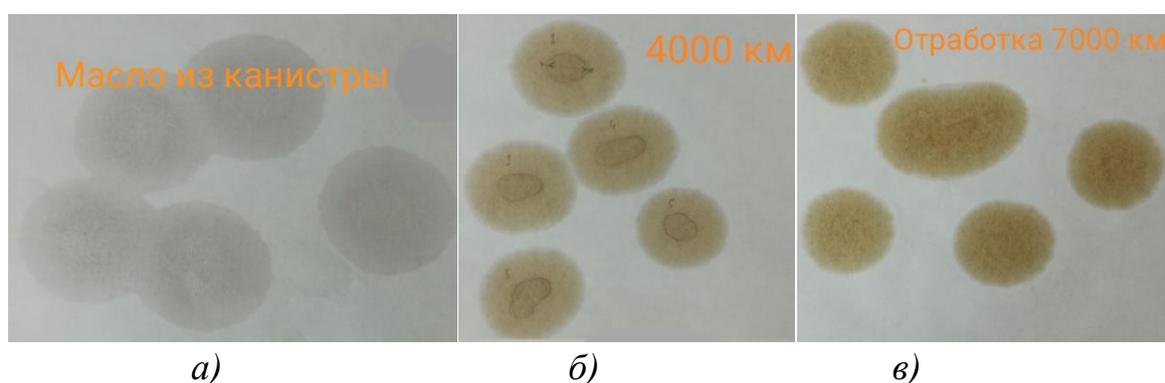


Рисунок 1 – Изучаемые хроматограммы

На рисунке 1 представлены пробы масла соответственно для: а) свежего масла; б) масла из двигателя, прошедшего 4000 км; в) отработанного масла с ресурсом 7000 км.

Новое масло, как видно на рисунке 1, состоит из сплошного светлого пятна без каких-либо вкраплений, что и говорит о его неиспользовании. А вот хроматограммы на последующих рисунках при правильной обработке могут многое сказать о его качестве и дальнейшем использовании. Разобьем все пробы на зоны и рассчитаем основные коэффициенты (рисунок 2).

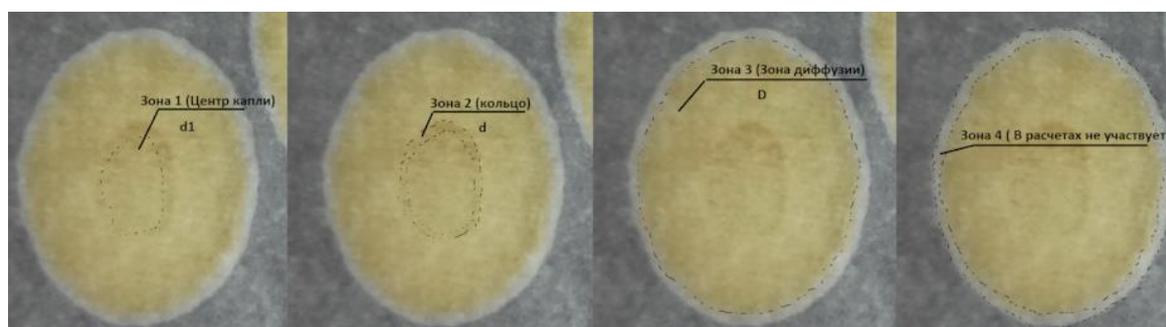


Рисунок 2 – Основные зоны изучаемого пятна

В связи с тем, что кольцо не идеально круглое, вычислим средний диаметр, определяя минимальный и максимальный диаметры, а затем вычислим среднее арифметическое и получим средний диаметр кольца (рисунок 3).

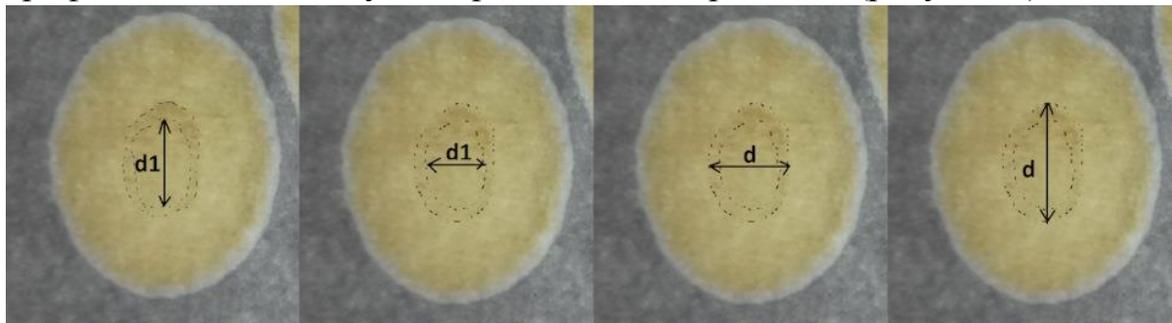
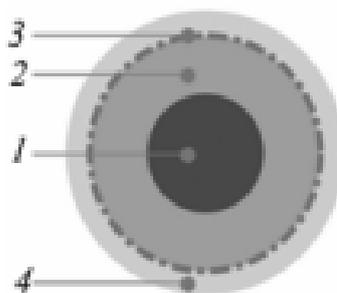


Рисунок 3 – Схемы к определению среднего диаметра кольца

Каждая зона имеет свои характерные особенности. В зоне ядра 1 осаждаются частицы механических примесей, не способные проникать в поры фильтровальной бумаги. Эта зона хорошо очерчена при небольшом пробеге двигателя и рабочем состоянии моторного масла. Интенсивность ее окраски характеризует количество механических примесей.



1 – ядро; 2 – зона диффузии; 3 – зона воды; 4 – зона топлива

Рисунок 4 – Зоны масляного пятна

В зоне диффузии 2 располагаются мелкие частицы механических примесей, способные проникать в поры бумаги. Эта зона наиболее показательна, поскольку ее ширина характеризует самые важные при эксплуатации свойства масла – его моющую и диспергирующую способности. Данные свойства определяют, насколько масло успешно справляется с задачами очищения деталей двигателя, а также расщепления и предотвращения образования наиболее опасных крупных комков загрязнений. Зона воды 3 представляет собой ровный невидимый контур, если в масле нет воды. Если же масло обводнено, то контур представляет собой ломаную, зигзагообразную линию. Если в масле, кроме воды, содержится охлаждающая жидкость – антифриз или тосол – то вокруг контура появляется желтое кольцо. Зона топлива 4 – это светлый ореол, ширина которого зависит от количества несгоревшего топлива, проникшего в масло. Зона хорошо различима при просмотре теста «на просвет».

Определив все диаметры, расчет произведем в редакторе Excel (рисунок 5), все остальные расчеты представим в виде сводной таблицы (таблица 1).

Коэффициент моюще-диспергирующих свойств моторного масла			
Вариант 1			
<b>Параметры капли №1</b>		<b>Параметры капли №2</b>	
Зона 1			
Диаметр окружности центра капли (d1), мм	среднее значение	минимум	максимум
	12,50	12	13
Зона 2			
Диаметр окружности кольца (d), мм	среднее значение	минимум	максимум
	18,5	18	19
Зона 3			
Диаметр окружности зоны диффузии (D), мм	среднее значение	минимум	максимум
	39	35	43
<b>ДС = 1-d<sup>2</sup>/D<sup>2</sup></b>	342,25		
	1444		
	0,24		
	<b>0,76</b>		
<b>Параметры капли №3</b>		<b>Параметры капли №4</b>	
Зона 1			
Диаметр окружности центра капли (d1), мм	среднее значение	минимум	максимум
	12,5	8	17
Зона 2			
Диаметр окружности кольца (d), мм	среднее значение	минимум	максимум
	13	9	17
Зона 3			
Диаметр окружности зоны диффузии (D), мм	среднее значение	минимум	максимум
	36	35	37
<b>ДС = 1-d<sup>2</sup>/D<sup>2</sup></b>	109		
	1296		
	0,13		
	<b>0,87</b>		
<b>Параметры капли №5</b>		<b>Среднее арифметическое всех капель</b>	
Зона 1			
Диаметр окружности центра капли (d1), мм	среднее значение	минимум	максимум
	12	10	14
Зона 2			
Диаметр окружности кольца (d), мм	среднее значение	минимум	максимум
	10,5	8	13
Зона 3			
Диаметр окружности зоны диффузии (D), мм	среднее значение	минимум	максимум
	32	29	35
<b>ДС = 1-d<sup>2</sup>/D<sup>2</sup></b>	110,25		
	1024		
	0,11		
	<b>0,89</b>		
		4,29	
		0,86	
<b>Норма</b>		от 0,5 до 1	
<b>Отклонение</b>		менее 0,5	

Рисунок 5 – Определение коэффициента  $k_{ДС}$  (ДС)

Таблица 1 – Расчет основных коэффициентов для каждой из проб

	$k_{ДС}$ (ДС)	$k_{МД}$	$k_{МПР}$
Проба 1 (4000 км)	0,86	2,77	0,88
Проба 2 (7000 км)	0,64	1,83	0,57

В итоге, по результатам эксперимента, можно сделать следующий вывод: характеристики для масла первой пробы (таблица 1) на порядок выше, чем у второй, что и подтверждается как органолептическим методом, так и расчетными показателями. Данная методика проста и эффективна для оценки состояния и качества масла, позволяющая определить непригодность масла и выявить какие-либо неисправности в работе двигателя и осуществить ее, что очень важно, можно в полевых условиях, не имея никаких специальных инструментов и навыков, а выбранное масло, как один из бюджетных вариантов, могло бы заменить более дорогостоящие импортные аналоги как в легковых авто, так и в с/х технике.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Standard Test Method for Measuring the Merit of Dispersancy of In-Service Engine Oils with Blotter Spot Method: ASTM D7899 – 19. – ASTM International, West Conshohocken, PA, 2019.

2. Капельная проба. Экспресс тест состояния масла // Oilchoice.ru. Форум по маслам, присадкам и смазкам [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.oilchoice.ru/viewtopic.php?t=1173>. – Дата доступа: 06.09.2023.

## ОБОСНОВАНИЕ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ПРИ РЕМОНТЕ АГРЕГАТОВ

**В. П. Иванов, Т. В. Вигерина, С. В. Пилипенко, А. В. Дудан,  
В. В. Кострицкий**

Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой,  
г. Новополоцк, Республика Беларусь

Ремонт полнокомплектных машин в последнее время практически упразднен стараниями народившегося бизнеса, а ремонт агрегатов организован с использованием новых деталей (запасных частей) часто сомнительного происхождения. В то же время фактические объемы ремонта растут [1], хотя ремонт машин с восстановлением деталей экономически целесообразен. Около четверти деталей ремонтного фонда не изношены или изношены в допустимых пределах и могут быть использованы повторно, а около половины деталей могут быть использованы после восстановления при его себестоимости 15–30 % от цены новых деталей. Практика показывает, что научно обоснованные процессы и организация восстановления изношенных деталей машин позволяют достичь их геометрических параметров и эксплуатационных свойств нормативного уровня [1] с долговечностью, не уступающей долговечности новых деталей, а в отдельных случаях и превзойти ее.

Ремонтное производство с восстановлением деталей сберегает много живого и овеществленного труда. При этом, в большинстве случаев, при восстановлении деталей машин тратится намного меньше ресурсов планеты, чем на изготовление новых деталей. Восстановление одной тонны деталей только за счет исключения металлургического передела позволяет сэкономить до 180 кВт·ч электроэнергии, 0,8 т угля и до 0,8 т известняка, 175 м<sup>3</sup> природного газа [2]. При этом масса отходов уменьшается в 20 раз. Так, на изготовление, например, одного коленчатого вала автомобильного двигателя с рабочим объемом 4,8 л расходуют 57 кг металла, 183 МДж энергии. Масса отходов при этом равна 2,5 кг. При восстановлении эти величины имеют значения примерно в двадцать раз меньшие, соответственно: 2,6 кг, 9,5 МДж и 0,12 кг. Применение вторичных ресурсов дополнительно экономит ресурсы планеты с уменьшением антропогенного влияния на окружающую среду. Доля себестоимости, приходящаяся на приобретение материалов при изготовлении деталей, составляет 75 %, а при их восстановлении – только 8 %, заработная плата рабочих на восстановление деталей в 2–3 раза меньшая, чем на их производство [3].

Цель работы – обосновать целесообразность организации восстановительных работ с определением их вида, с целью содержания парка машин в исправном состоянии в течение всего срока их службы.

Использование при ремонте машин восстановленных деталей, по сравнению с новыми деталями, определяется сопоставлением их по цене,

долговечности и сопутствующими факторами. К последним относятся: потери, связанные с остановкой машины на время ремонта соответствующего агрегата, затраты на его снятие, разборку, определение технического состояния деталей, их восстановление или приобретение, сборку, окрашивание, обкатку, испытания и установку на машину. Целесообразность организации производства по восстановлению деталей определяют объемами производства, видом и массой восстанавливаемых деталей следующим образом [4]:

– уточняют технологию восстановления деталей данной номенклатуры и определяют стоимость затрат на их восстановление;

– сравнивают затраты на восстановление деталей с затратами на изготовление определением целесообразности восстановления деталей данной номенклатуры;

– на основании расчета максимального расстояния перевозки деталей на ремонтное предприятие определяют оптимальные размеры обслуживаемого региона.

Затраты на восстановление деталей  $Z_v$  заданной номенклатуры не должны превышать затраты на их изготовление  $Z_n$  машиностроительным заводом:

$$Z_v < Z_n, \quad (1)$$

$$Z_v = Z_{v.пр} + Z_{v.p} + Z_{p.c} + Z_{m.z.ч} + K_{y.v}, \text{ руб.}, \quad (2)$$

$$Z_n = Z_{n.пр} - Z_o + K_{y.n}, \text{ руб.}, \quad (3)$$

$$\text{при } L_{ф.д} = L_{н.а}, \text{ или } L_{ф.д} = 0,5L_{н.а},$$

где  $Z_{v.пр}$  – затраты на восстановление детали (производственные), руб.;  $Z_{v.p}$  – затраты (предпроизводственные) на использование вторичных ресурсов, используемых в качестве материалов при восстановлении деталей, руб.;  $Z_{p.c}$  – затраты на разборочные и сборочные работы агрегата, связанные с заменой отказавшей детали, руб.;  $Z_{m.z.ч}$  – затраты на материалы и запасные части, являющиеся сопряженными деталями, руб.;  $K_{y.v}$  – удельные капитальные вложения на создание участка восстановления деталей (с учетом затрат на участок переработки вторичных ресурсов), руб.;  $Z_{n.пр}$  – затраты на изготовление детали (производственные), руб.;  $Z_o$  – остаточная стоимость детали ремонтного фонда, руб.;  $K_{y.n}$  – удельные капитальные вложения на создание производства по изготовлению деталей, руб.;  $L_{ф.д}$  – фактическая долговечность детали, тыс. км пробега;  $L_{н.а}$  – нормативная долговечность агрегата, тыс. км пробега.

Необходимо учитывать затраты на переработку вторичных ресурсов, используемых в качестве материалов при восстановлении деталей машин. Например, в качестве материала для восстановления поверхностей деталей может использоваться металлическая стружка, образующаяся при точении инструментальных и шарикоподшипниковых сталей [5]. Следует отметить и экологический аспект возможности переработки отходов производства в используемый материал, хотя само уменьшение антропогенного влияния на окружающую среду сложно поддается экономическим оценкам.

Выражение (1) должно быть дополнено соответствующим ограничением кратности наработки восстановленных деталей относительно регламентированного межремонтного пробега агрегата. При разработке технологии восстановления детали следует выбирать технические решения, которые позволяют уве-

личивать наработку восстановленных деталей, например, повышением износостойкости их поверхностей. Агрегат состоит из изнашиваемых и неизнашиваемых деталей разной долговечности с различными размерами и повреждениями. Средние ресурсы деталей двигателей в долях ресурса их базовых деталей (блоков цилиндров), определенные опытным путем, приведены в таблице.

Таблица – Относительные ресурсы деталей двигателей

Наименования деталей	Относительный ресурс, доля
Блок цилиндров	1,00
Гильза цилиндра	0,68–0,90
Головка цилиндров	0,89–0,90
Поршень	0,60–0,63
Поршневое кольцо компрессионное	0,44–0,45
Поршневое кольцо маслосъемное	0,45–0,47
Шатун	1,00
Поршневой палец	0,92–1,00
Коленчатый вал	0,63–0,87
Вкладыши коленчатого вала коренные	0,47–0,53
Вкладыши коленчатого вала шатунные	0,46–0,50
Распределительный вал	0,86–1,00
Клапан впускной	0,63–0,95
Клапан выпускной	0,70–0,77
Толкатель	0,89–1,00

Базовые корпусные детали обладают большой жесткостью и статической прочностью. В них отсутствуют трущиеся элементы (например, существуют заменяемые вставки в местах), где осуществляются трибологические взаимодействия с другими деталями. Такие детали имеют долговечность, которая значительно превышает амортизационную наработку самого агрегата. Если в детали имеются трущиеся части, то их долговечность понижается по сравнению с долговечностью корпусных деталей.

В ходе текущего ремонта агрегата заменяют наиболее изнашиваемые детали. При проведении среднего ремонта, как правило, замене подлежат детали с ресурсом, равным половине ресурса базовой детали. Именно эти детали и должны составлять ремонтный комплект, который используется при таком ремонте агрегата.

Современное состояние науки и практики позволяет осуществить приведенное выше условие на новом уровне. Например, нанесение покрытий при восстановлении трущихся поверхностей деталей с насыщением их материала необходимыми легирующими элементами подобно химико-термической обработке поверхностных слоев связано с образованием материала нового химического, структурного и фазового состава, отличного от материала основы. При нанесении таких покрытий возможно использовать вторичные материалы в большом количестве.

Восстановление деталей целесообразно организовывать в случае, когда объемы работ в рассматриваемом регионе достаточны для создания крупносерийного или массового типа производства

$$\frac{\Phi_{\text{д.о}}}{t_{\text{ш.к}}} \leq A_c k_b n_d \frac{L_r}{L_{\text{м.р}}}, \text{ год}^{-1}, \quad (4)$$

где  $\Phi_{\text{д.о}}$  – годовой действительный фонд времени работы оборудования, ч/год;  $t_{\text{ш.к}}$  – штучно-калькуляционное время наиболее трудоемкой операции технологического процесса восстановления детали, ч;  $A_c$  – списочное количество машин (агрегатов), эксплуатирующихся в данном районе;  $k_b$  – среднее значение суммарного коэффициента восстановления по маршрутам, определяемым повреждениями или их сочетаниями, при которых деталь подлежит восстановлению;  $n_d$  – количество деталей данного наименования в одном агрегате;  $L_r$  – средняя годовая наработка машины (агрегата), тыс. км пробега/год;  $L_{\text{м.р}}$  – средний межремонтный пробег агрегата, составной частью которого является рассматриваемая деталь, тыс. км пробега.

Смысл неравенства (4) заключается в том, что в обслуживаемом регионе одноименных восстанавливаемых деталей должно быть достаточно для непрерывной загрузки производства в течение года. Действительное расстояние перевозки деталей на восстановление  $L_d$  должно быть не больше расчетного  $L_p$

$$L_d \leq L_p \text{ км}, \quad (5)$$

$$L_p = \frac{Z_{\text{в.с}}}{m_d T} \left[ \frac{Z_{\text{р.с}} + Z_{\text{м.з.ч}}}{Z_{\text{в.с}}} - 1,03 \left( \frac{N_c}{N_m} \right)^b \right], \text{ км}, \quad (6)$$

где  $Z_{\text{в.с}}$  – затраты на восстановление детали на универсальном участке серийного типа производства, руб.;  $m_d$  – масса детали, кг;  $T$  – тариф на перевозку детали массой 1 кг на расстояние 1 км, руб./кг×км;  $N_c$ ,  $N_m$  – годовые объемы работ по восстановлению деталей, соответственно, на универсальном участке серийного типа производства и специализированном участке массового типа производства, год<sup>-1</sup>;  $b$  – коэффициент, значение которого в пределах 1,00–1,25 зависит от особенностей технологического процесса восстановления детали.

Источники экономического эффекта заключены в применении более совершенной организации производства (с учетом транспортировки), что приводит к снижению себестоимости восстановления деталей.

Отмеченное выше позволяет оптимизировать создаваемую структуру ремонтно-восстановительного производства, выбрать мероприятия по повышению его эффективности и определить рациональную область расширения охвата потребителей с целью увеличения объемов производства с повышением качества восстановления деталей на специализированных участках.

Чем больше машин в регионе и их годовая наработка, тем выше объемы восстановления деталей. Значительные объемы восстановления легче обеспечиваются при ремонте многочисленных недолговечных деталей небольшой массы. Но само количество деталей, даже при незначительной географической распространенности региона, подразумевает применение современных логистических технологий. Особенно резкое снижение этого расстояния наблюдается для деталей большой массы, себестоимость

восстановления которых небольшая. Наиболее целесообразна организация массового восстановления блоков, головок и гильз цилиндров, коленчатых и распределительных валов и других деталей на поточно-механизированных линиях. Такие проекты необходимо организовывать на государственном уровне по типовой или модульной технологиям. Технический уровень восстановительного производства, оцениваемый параметрами средств технологического оснащения, не должен уступать техническому уровню соответствующего машиностроительного производства.

Алгоритм обоснования целесообразности восстановления деталей машин на специализированных производственных участках (рисунок) предусматривает оптимизацию накладных расходов, так как их доля в себестоимости восстанавливаемых деталей значительна. Предусмотрена корректировка размеров региона и оптимизация технологии перевозки. Предложенный алгоритм позволяет создать экономически обоснованную технологию восстановления деталей машин, создать оптимальную сеть таких предприятий.

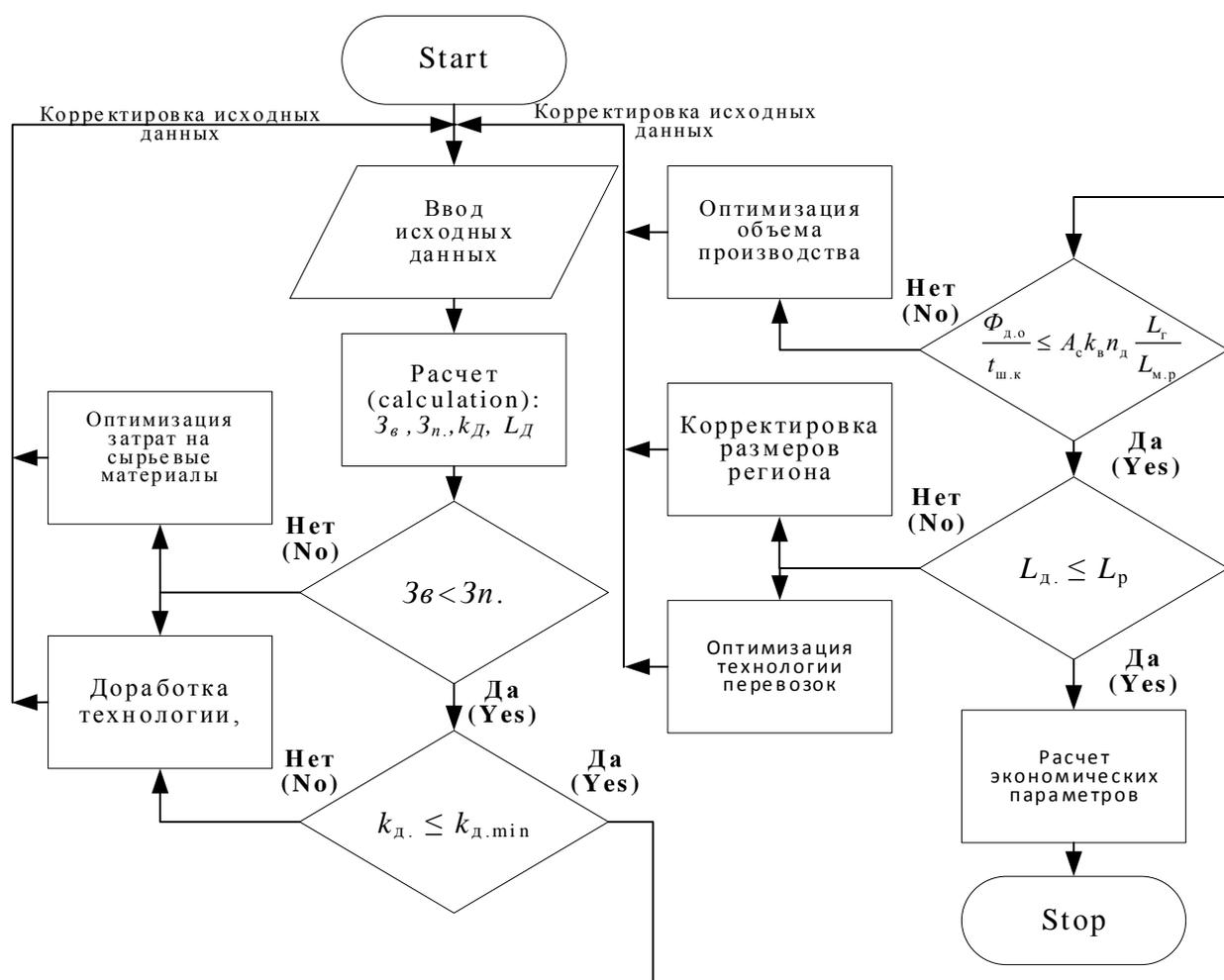


Рисунок – Алгоритм обоснования целесообразности восстановления деталей машин на специализированных производственных участках

Таким образом, восстановление деталей на специализированных участках серийного или массового типа производства обеспечивает эффективность ремонтного производства с обеспечением нормативной долговечности отремонтированных агрегатов. Определены условия целесообразности восстановления деталей данной номенклатуры сравнением затрат на их восстановление с затратами на изготовление, и определены размеры обслуживаемого региона в виде максимального расстояния перевозки деталей на восстановление.

Долговечность трущихся поверхностей восстановленных деталей может быть существенно повышена износостойкими покрытиями или слоями соответствующего химического и фазового состава с термической обработкой, что обеспечивает кратность наработки восстановленных деталей межремонтному пробегу агрегата при полном использовании остаточной долговечности деталей. Предложено введение в систему содержания машин в исправном состоянии среднего ремонта агрегатов, при котором заменяют детали, ресурс которых составляет примерно половину от ресурса базовой детали. Эти детали составляют подготавливаемый ремонтный комплект.

Предложен алгоритм обоснования целесообразности восстановления деталей на специализированных производственных участках.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Попов, В. В. Формирование методов оптимизации и оценки потребности в техническом обслуживании и ремонте МТП / В. В. Попов, Н. А. Мочунова, М. А. Карапетян // Международный технико-экономический журнал. – 2019. – № 3. – С. 87–89.

2. Иванов, В. П. Обоснование рентабельности ремонта автомобильных агрегатов // Инновационные технологии в машиностроении: сборник материалов международной научно-технической конференции, посвященной 50-летию машиностроительных специальностей и 15-летию научно-технологического парка Полоцкого государственного университета / В. П. Иванов, Т. В. Вигерина. – Новополоцк : Полоцкий гос. ун-т, 2020. – С. 154–156.

3. Масино, М. А. Организация восстановления автомобильных деталей / М. А. Масино. – М. : Транспорт, 1981. – 176 с.

4. Какуевицкий, В. А. Восстановление деталей автомобилей на специализированных предприятиях / В. А. Какуевицкий. – М. : Транспорт, 1989. – 149 с.

5. Пилипенко, С. В. Использование вторичных материалов при восстановлении работоспособности втулок подшипников скольжения / С. В. Пилипенко, В. А. Фруцкий, А. В. Дудан. // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 5. – С. 130–137.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ РЕЖИМА РАБОТЫ КОНВЕЙЕРА ОБРАБОТКИ ТУШ ОТ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ЛИНИИ УБОЯ КРС

*А. Н. Литвинович*

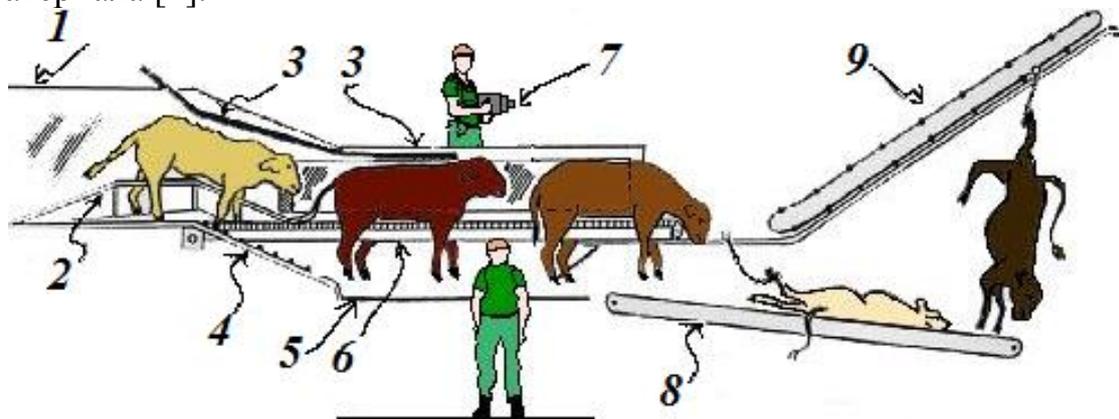
*Брестский государственный технический университет,  
г. Брест, Республика Беларусь*

### Введение

По характеру движения подвесные конвейеры делятся на непрерывные и пульсирующие. В отличие от конвейеров с непрерывным движением цепи, пульсирующие конвейеры позволяют осуществлять операции не при непрерывном движении туш, а в состоянии покоя, что облегчает выполнение операций. Таким образом, работа в пульсирующем режиме предпочтительнее. При проектировании технологических линий возникает задача определения режима работы конвейера, т. к. от него зависит конструкция применяемого оборудования, площадок, расстановка бойцов и др. В свою очередь, режим работы конвейера зависит от производительности линии, поэтому возникает задача определения максимально возможной производительности линии в пульсирующем режиме.

### Отличительные особенности непрерывных линий убоя

Опишем технологическую линию убоя КРС производительностью 275 голов/час компании EXCEL (город Плейнвью, штат Техас, США) на основе видеоматериала [1].



1 – входной прогон, 2 – распорка для ног, 3 – прижимная стойка,  
4 – входной пандус, 5 – фальшпол, 6 – конвейер, 7 – пневматический пистолет,  
8 – пластинчатый конвейер, 9 – элеватор

**Рисунок 1– Конвейерная система оглушения**

### Оглушение

КРС по прогону 1 перемещаются к конвейеру 6. Верхняя часть конвейера 6 находится на уровне пола входного прогона 1. Стационарная распорка ног 2 направляет ноги животного в правильное положение. Животные спускаются по рифленому нескользящему пандусу 4, расположенному под углом не более 25 градусов. Для обеспечения неподвижности и спокойствия скота используется прижимная стойка 3, которая должна быть достаточно длинной, чтобы живот-

ное, входящее в бокс оглушения, не могло видеть, пока его ноги полностью не оторвутся от входного пандуса 4. В данной системе оглушения обязательно наличие фальшпола 5 чуть ниже ног животного, т. к. скот будет упираться и отказываться входить, если увидит крутой обрыв под конвейером.

После того, как голова КРС проехала прижимную стойку 3, боец производит оглушение пневматическим пистолетом 7. Затем на заднюю ногу КРС во время движения конвейера 6 накладывается путовая цепь бойцом, расположенным под конвейером оглушения. Оглушенное животное падает с конвейера 6 на пластинчатый конвейер 8. Двигаясь с помощью этого конвейера, КРС тянет за собой по направляющим каретку путовой цепи, которая входит в зацепление с толкателями элеватора 9, после чего КРС начинает подъем на путь обескровливания.

### **Съем шкуры**

Из-за высокой производительности линии для съема шкуры последовательно применяется 3 вида шкуроръемных машин: боковой съемник (side puller), верхний съемник (up puller), нижний съемник (down puller).

Изначально бойцы при помощи пневматических ножей производят забеловку живота и грудной клетки. Затем при помощи бокового съемника происходит съем шкуры с боков туши (см. рисунок 2а) в следующей последовательности:

- 1) боковой съемник входит в синхронное движение с тушей;
- 2) боец кладет висящую шкуру в левый захват 1 и нажимает кнопку на пульте управления 3 для его срабатывания, те же действия выполняются и другим бойцом с правой стороны;
- 3) боец нажимает кнопку на главном пульте управления, после чего запускается процесс съема шкуры;
- 4) гидроцилиндры 4 и 6 начинают двигаться одновременно:
  - под позицией 4 – втягивают штоки, тем самым производя отрыв шкуры;
  - под позицией 6 – выдвигает шток, из-за чего пластина 5 прижимается к спине туши. Это обеспечивает ее стабильное положение во время процесса;
- 5) захваты 1 отпускают шкуру.

Далее боец отделяет шкуру таким образом, чтобы между шкурой и спиной можно было просунуть толстый стержень верхнего съемника (рисунок 2б), после этого происходит съем шкуры со спины на данной машине с последующей стерилизацией стержня.

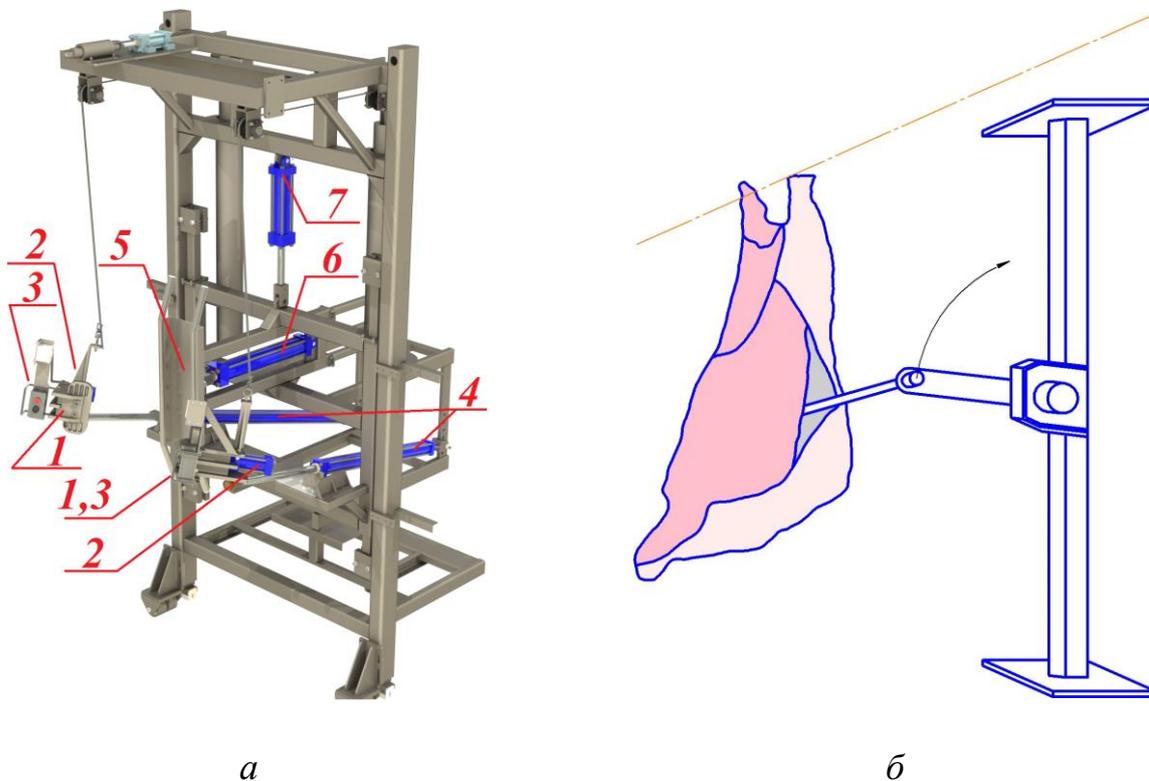
Завершающий этап съема шкуры происходит на нижнем съемнике. Рабочим органом данной машины является неподвижный цилиндр, закрепленный только с одной стороны и имеющий продольную прорезь. После того как шкура попадает в прорезь, барабан начинает вращение и шкура наматывается на него. После завершения процесса барабан разматывает шкуру и она падает в отверстие в полу для последующей обработки.

### **Нутровка**

Отличительной особенностью данной операции является то, что выемка внутренних органов осуществляется бойцами, стоящими на непрерывно движущемся конвейере (рисунок 3).

## Распиловка на полутуши

После нутровки туши разделяются на полутуши. Двое рабочих с ручными ленточными пилами стоят на платформе (см. рисунок 4), которая опускается не вертикально, а под некоторым углом, что позволяет делать распил во время движения конвейера.



1 – захват для шкуры; 2, 4, 6, 7 – гидроцилиндр;  
3 – пульт управления захватом; 5 – пластина;  
*а* – боковой съемник; *б* – верхний съемник  
Рисунок 2 – Виды шкуроеъемных машин



Рисунок 3 – Нутровка



Рисунок 4 – Площадка для распиловки туш

## Методика расчетов

В первом приближении можно заключить, что критическая точка перехода одного режима работы в другой находится в диапазоне 60–275 голов/час, т. к. линия, установленная на Брестском мясокомбинате, работает в пульсирующем режиме и имеет производительность 60 голов в час.

При работе в пульсирующем режиме за 60 мин. должно быть обработано  $N$  туш, данное число определяется необходимой производительностью линии, при этом часть времени конвейер будет останавливаться для выполнения операций, а другую часть – смещать туши на шаг между ними (для КРС 1,9 м). Запишем данные рассуждения в виде формулы

$$3600 = t_{\text{ост.общ}} + t_{\text{движ.общ}}, \quad (1)$$

где 3600 – время, за которое будет обработано  $N$  туш, с.,

$t_{\text{ост.общ}}$  – общее время остановок конвейера, с.,

$t_{\text{движ.общ}}$  – общее время движения конвейера, с.

Времена  $t_{\text{ост.общ}}$  и  $t_{\text{движ.общ}}$  удобнее выразить через время одной остановки и одного смещения:

$$t_{\text{ост.общ}} = N \cdot t_{\text{ост.}}; t_{\text{движ.общ}} = (N - 1) \cdot t_{\text{движ.}} \quad (2)$$

Следовательно, формулу (1) можно представить в виде:

$$3600 = N \cdot t_{\text{ост.}} + (N - 1) \cdot t_{\text{движ.}} \quad (3)$$

Зададимся  $t_{\text{движ.}} = 10$  с. по причине необходимости стерилизации инструмента между операциями и уменьшения утомляемости бойцов.

Тогда:

$$t_{\text{ост.}} = (3600 - (N - 1) \cdot t_{\text{движ.}}) / N \quad (4)$$

Используя формулу (4) можно найти время  $t_{\text{ост.}}$  в диапазоне производительностей 60–275 голов/час. Результаты расчетов приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Зависимость времени остановки конвейера от производительности

Пр-ть, голов/час	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170
$t_{\text{ост.}}$ , сек.	41,6	35,13	30,11	26,1	22,82	20,08	17,77	15,79	14,07	12,56	11,24
Пр-ть, голов/час	180	190	200	210	220	230	240	250	260	270	280
$t_{\text{ост.}}$ , сек.	10,06	9	8,05	7,19	6,41	5,70	5,04	4,44	3,88	3,37	2,89

По формуле (4) переход пульсирующего режима работы конвейера в непрерывный произойдет при производительности 360 голов/час ( $t_{\text{ост.}} = 0$ ), однако она не может считаться предельной для пульсирующего режима по нескольким причинам:

1) по таблице 1 можно заметить, что при производительности 280 голов/час  $t_{\text{ост.}} = 2,89$  с. При данном времени невозможно качественно выполнить какую-либо технологическую операцию или ее часть, также работа человека на такой скорости будет утомительной. По данной причине принимаем  $t_{\text{ост.}} \geq 10$  с.;

2) на выполнение каждой операции требуется определенное количество времени. В таблице [2, стр. 126] приведены примерные затраты оперативного

времени (нормы времени) на каждую операцию. Зная время выполнения операции и время остановки конвейера при определенных производительностях, можно определить количество позиций, на которых данная операция может быть выполнена:

$$n = t_{\text{оп.}} / t_{\text{ост.}}, \quad (5)$$

где  $t_{\text{оп.}}$  – время на выполнение операции, с.

Используя формулы (4) и (5), составили таблицу 2 (приводится в сокращенном варианте).

Стоит учитывать, что одни операции возможно разбить на несколько этапов, а другие нельзя. Как раз последние и будут выступать в качестве ограничений. В таблице 2 данные операции выделены цветом. На основании таблицы можно заключить, что по этим операциям максимальная производительность в пульсирующем режиме:

– для операций «наложение лигатуры на пищевод», «распиловка грудной кости», «распиловка туш по позвоночнику» – 140 голов/час;

– для операции «распиловка (разрубка) лонного сращения» – 120 голов/час;

– для операции «съемка шкуры на механической установке» – 90 голов/час.

Операцию «распиловка (разрубка) лонного сращения» можно ускорить до 15 с., а операцию «съемку шкуры на механической установке» – осуществить за несколько этапов по схеме, описанной выше. Делаем вывод, что максимальная производительность в пульсирующем режиме составляет 140 голов/час, при которой время остановки конвейера равняется 16 с., что приемлемо ( $16 > 10$ ). При производительности 140 голов/час необходимо применять 2 бокса оглушения «классической конструкции» [3, стр. 13] или конвейерную систему оглушения (см. рисунок 1).

Для работы линии в пульсирующем режиме при производительности большей 140 голов/час необходимо сократить  $t_{\text{движ.}}$  или ускорить время выполнения вышеперечисленных операций благодаря применению средств автоматизации.

Таблица 2 – Расчет количества рабочих мест на операции

Операция переработки крупного рогатого скота	$t_{\text{оп.}}, \text{ с.}$	Кол-во рабочих мест на операцию, при производительности, голов/час							
		110	120	130	140	150	160	170	180
<b>Убой и обескровливание</b>									
Подгон животного в бокс	15	1)							
Оглушение (кол-во боксов)	30	2	2	2	2	3	3	3	3
Наложение путовых цепей	5	1	1	1	1	1	1	1	1
Подъем животного на подвесной путь	15	2)							
Подача животного на обескровливание	10								
Наложение лигатуры на пищевод	15	1	1	1	1	2	2	2	2
Обескровливание полым ножом и сбор пищевой крови	50	3)							
Стекание крови на технические цели	600	19	20	22	24	25	27	29	30

Продолжение таблицы

<b>Забеловка и съемка шкуры</b>									
Съемка шкуры с передн. конечн. и отдел. путового сустава	40	2	2	3	3	3	4	4	4
Съемка шкуры с головы	45	4)							
Забеловка свободной задней конечн. и отделение путового сустава (*)	65	3	4	4	5	5	6	6	7
Перевеска туши с пути обескровливания на путь обработки	15	1	1	1	1	2	2	2	2
(*) тоже, только 2й задней ноги	65	3	4	4	5	5	6	6	7
Заделка проходника	15	1	1	1	1	2	2	2	2
Забеловка грудной и брюшной частей туши	30	2	2	2	2	3	3	3	3
Забеловка шкуры бедер	30	2	2	2	2	3	3	3	3
Забеловка шкуры левой лопатки	30	2	2	2	2	3	3	3	3
Забеловка шкуры правой лопатки	30	2	2	2	2	3	3	3	3
Фиксация шкуры цепью для механической съемки	15	1	1	1	1	2	2	2	2
Фиксация туши для механической съемки шкур	15	1	1	1	1	2	2	2	2
Съемка шкуры на механической установке	40	2	2	3	3	3	4	4	4
Отделение головы, подвеска головы на путь обработки голов, препарирование - вытягивание языка для ветеринарного осмотра	40	2	2	3	3	3	4	4	4
Выключение туши из установки для съемки шкур	15	1	1	1	1	2	2	2	2
<b>Удаление внутренностей</b>									
Растяжка задних конечностей туши	12	1	1	1	1	1	1	1	1
Распиловка грудной кости	15	1	1	1	1	2	2	2	2
Заделка (препарирование) пищевода	17	1	1	1	2	2	2	2	2
Распиловка (разрубка) лонного сращения	20	1	1	2	2	2	2	2	2
Нутровка (удаление желудочно-кишечного тракта)	30	2	2	2	2	3	3	3	3
Ливеровка (удаление ливера)	30	2	2	2	2	3	3	3	3
Разборка ливера	20	1	1	2	2	2	2	2	2
Разборка кишок и желудка	20	1	1	2	2	2	2	2	2
Распиловка туш по позвоночнику	15	1	1	1	1	2	2	2	2
Передача туш на подвесной путь туалета	15	1	1	1	1	2	2	2	2
<b>Туалет туш</b>									
Надрез и отделение почек	15	1	1	1	1	2	2	2	2
Срез жира с паховой и тазовой частей и отрезка хвоста	25	2	2	2	2	2	2	3	3
Отделение почечного жира	20	1	1	2	2	2	2	2	2
Зачистка верхней части туши	15	1	1	1	1	2	2	2	2
Зачистка нижней части туши	20	1	1	2	2	2	2	2	2
Промывка туш щеткой	40	2	2	3	3	3	4	4	4
Срезка остатков диафрагмы	15	1	1	1	1	2	2	2	2
Сборка грудного жира	15	1	1	1	1	2	2	2	2
Сухой туалет	40	2	2	3	3	3	4	4	4
Окончательный туалет	15	1	1	1	1	2	2	2	2
Откатка туши на весы и от весов	25	2	2	2	2	2	2	3	3

**Примечания:** 1) для всех производительностей достаточно 1–2 бойца; 2) данные операции для любой производительности выполняются элеватором и конвейером обескровливания соответственно; 3) происходит на позициях сбора технической крови; 4) т. к. съемка шкуры с головы происходит на уровне пола, возможно совмещение этой операции, например, с забеловкой задней ноги.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Beef Packing Plant Tour: Slaughter [Electronic resource]. – Mod of access: <https://vimeo.com/29486603>. – Date of access: 27.09.2023.
2. Технология мяса и мясопродуктов : учеб. для вузов / А. А. Соколов [и др.] ; под общ. ред. А. А. Соколова. – Изд. 2-е, перераб. – Москва : Пищевая пром-сть, 1970. – 739 с.
3. Методические указания к практической работе № 1 «Разработка технологической линии убоя и разделки скота» по дисциплине «Оборудование пищевых производств» для студентов специальности 1-36 09 01 «Машины и аппараты пищевых производств» : в 2 ч. Брест. гос. техн. ун-т ; сост.: Н. У. Ляшук, А. Н. Литвинович. – Брест : БрГТУ, 2022. – Ч. 1 : Технологические линии для производства пищевых продуктов. – 39 с.

УДК 539.3

### ОБ УСТОЙЧИВОСТИ ПОДКРЕПЛЕННЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ ОСЕВЫМ СЖАТИЕМ Игнатюк В.И.

Брестский государственный технический университет;  
г. Брест, Республика Беларусь

**Введение.** Тонкостенные цилиндрические оболочки находят широкое применение в элементах машиностроительных конструкций. Учитывая высокую прочность оболочек, их допустимую нагрузку при действии внешнего давления чаще всего определяет их устойчивость. Более высокая устойчивость будет у оболочек, подкреплённых ребрами жесткости. Такие элементы в машиностроении могут подвергаться динамическим воздействиям. В этом случае говорят о динамической устойчивости элементов.

**Постановка задачи.** Подкреплённая оболочка рассматривается как система, состоящая из круговой тонкостенной цилиндрической оболочки, усиленной жестко с ней соединёнными по линиям контакта продольными (стрингерами) и поперечными (шпангоуты) ребрами, которые могут располагаться как с внешней, так и с внутренней сторон (рисунок 1).

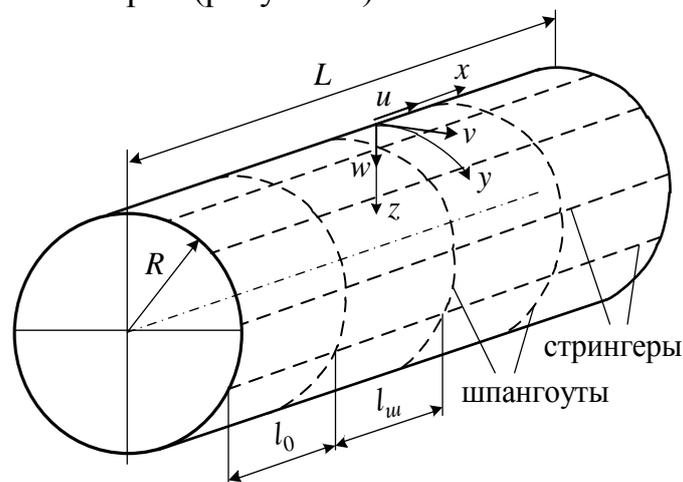


Рисунок 1 – Расчетная схема подкреплённой цилиндрической оболочки

Оболочка нагружается осевой сжимающей нагрузкой, быстро возрастающей во времени по линейной зависимости со скоростью возрастания осевых сжимающих напряжений  $\gamma$ .

Для расчета оболочки используется линейная теория тонких упругих оболочек средней длины [1], а для расчета ребер – теория криволинейных стержней. При этом по высоте сечения принимается справедливой гипотеза прямолинейного недеформируемого элемента как для оболочки, так и в целом для системы «оболочка-ребро» (в местах наличия ребер). Учитываются дискретность расположения ребер и их несимметричное расположение относительно срединной поверхности оболочки.

Считаем, что обеспечены условия шарнирного опирания по торцевым краям оболочки.

**Уравнение движения системы.** При динамическом нагружении для решения задачи необходимо рассматривать уравнение движения системы, для получения которого используем уравнение Лагранжа второго рода

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial \Lambda}{\partial \dot{q}_s} \right) - \frac{\partial \Lambda}{\partial q_s} = 0, \quad (1)$$

где:  $\Lambda = K - \mathcal{E}$  – функция Лагранжа;  $\mathcal{E}$  – полная потенциальная энергии подкрепленной оболочки;  $K$  – кинетическая энергия системы;  $q_s$  – обобщенные координаты, в качестве которых принимаются перемещения по направлениям деформирования элемента –  $u$ ,  $v$  и  $w$ .

Полная потенциальная энергия системы, подверженной действию внешних нагрузок, определяется как сумма потенциальной энергии деформирования системы  $U$ , возникающей при переходе системы из недеформированного состояния в деформированное, и изменения потенциальной энергии внешних сил  $A$ , определяемой работой этих сил при деформировании системы, состоящей из оболочки и ребер:

$$\mathcal{E} = U + A = U_o + U_c + U_{ш} + A_o + A_c, \quad (2)$$

где:  $U_o$ ,  $U_c$ ,  $U_{ш}$  – потенциальные энергии деформирования соответственно оболочки, стрингеров и шпангоутов;  $A_o$ ,  $A_c$  – изменение потенциальной энергии внешних сил, действующих на оболочку и стрингеры.

При записи потенциальной энергии системы здесь будем пренебрегать нормальными напряжениями на площадках, параллельных срединной поверхности и поперечными сдвигами (на площадках, нормальных к срединной поверхности  $zx$  и  $zy$ ).

Выражение потенциальной энергии деформирования оболочки через деформации срединной поверхности [2] имеет вид:

$$U_o = \frac{1}{2} \int_0^L \int_0^{2\pi R} \left[ C_{11} \varepsilon_1^2 + 2C_{12} \varepsilon_1 \varepsilon_2 + C_{22} \varepsilon_2^2 + C_{66} \chi^2 + \right. \\ \left. + D_{11} \kappa_1^2 + 2D_{12} \kappa_1 \kappa_2 + D_{22} \kappa_2^2 + D_{66} \eta^2 \right] dx dy. \quad (3)$$

Здесь:  $\varepsilon_1, \varepsilon_2$  – относительные продольные деформации срединной поверхности оболочки в направлениях осей  $x$  и  $y$ ;  $\chi$  – сдвиг срединной поверхности;  $\kappa_1, \kappa_2$  – изменения кривизн срединной поверхности в направлениях осей  $x$  и  $y$ ;  $\eta$  – изменение кручения срединной поверхности при деформации;  $C_{jk}, D_{jk}$  – жёсткости оболочки, определяемые выражениями:

$$C_{jk} = 2B_{jk}h; \quad D_{jk} = 2B_{jk}h^3,$$

где:  $B_{11} = \frac{E_1}{1-\nu_{12}\nu_{21}}$ ;  $B_{22} = \frac{E_2}{1-\nu_{12}\nu_{21}}$ ;  $B_{12} = B_{21} = -\frac{\nu_{12}E_1}{1-\nu_{12}\nu_{21}}$ ;  $B_{66} = G_{12}$ ;  $E_1, E_2$  – модули Юнга материала оболочки соответственно по направлениям  $x$  и  $y$ ;  $G_{12}$  – модуль сдвига материала оболочки в плоскости  $xy$ ;  $\nu_{12}, \nu_{21}$  – коэффициенты Пуассона материала оболочки;  $h$  – толщина оболочки.

Компоненты деформаций срединной поверхности, соответствующие общей технической теории тонких оболочек [2], имеют вид:

$$\varepsilon_1 = \frac{\partial u}{\partial x}; \quad \varepsilon_2 = \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{w}{R}; \quad \chi = \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y}; \quad \kappa_1 = -\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}; \quad \kappa_2 = -\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}; \quad \eta = -2\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y}. \quad (4)$$

где:  $u, v, w$  – перемещения точек срединной поверхности в направлениях осей  $x, y, z$  (рисунок 1).

Подставляя (4) в (3), получим выражение полной потенциальной энергии оболочки в виде:

$$U_o = \frac{1}{2} \int_0^L \int_0^{2\pi R} \left\{ C_1 \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + 2C_{12} \frac{\partial u}{\partial x} \left( \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{w}{R} \right) + C_{22} \left( \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{w}{R} \right)^2 + \right. \\ \left. + C_{66} \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + D_{11} \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right)^2 + 2D_{12} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + D_{22} \left( \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right)^2 + 4D_{66} \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right)^2 \right\} dx dy \quad (5)$$

Потенциальная энергия деформации ребер (стрингеров и шпангоутов), подкрепляющих оболочку, запишем с учетом энергий изгиба, сжатия и кручения (при этом принимается, что энергией изгиба из плоскости ребер и энергией поперечного сдвига ребер можно пренебречь) [2]:

$$U_c = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{k_c} \int_0^L \left\{ E_c F_c \left[ \frac{\partial u}{\partial x} + h_c \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) \right]^2 + E_c J_{yc} \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right)^2 + G_c J_{kr c} \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right)^2 \right\} \Big|_{y=y_i} dx; \quad (6)$$

$$U_{ш} = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^{k_{ш}} \int_0^{2\pi R} \left\{ E_{ш} F_{ш} \left[ \frac{\partial v}{\partial y} + h_{ш} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} - \frac{w}{R_{ш}} \right]^2 + E_{ш} J_{xш} \left( \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{w}{R_{ш}^2} \right)^2 + \right. \\ \left. + G_{ш} J_{kr ш} \left[ \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} + \frac{1}{R_{ш}} \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{h_{ш}}{R_{ш}} \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right) \right]^2 \right\} \Big|_{x=x_j} dy, \quad (7)$$

где:  $k_c, k_{uu}$  – число стрингеров и шпангоутов;  $E_c, G_c$  и  $E_{uu}, G_{uu}$  – модули упругости и сдвига материалов стрингеров и шпангоутов;  $F_c, J_{yc}, J_{kr c}$  и  $F_{uu}, J_{x uu}, J_{kr uu}$  – площади поперечных сечений, осевые моменты инерции и кручения сечений соответственно стрингеров и шпангоутов;  $h_c, h_{uu}$  – эксцентриситеты стрингеров и шпангоутов;  $R_{uu} = R + h_{uu}$ .

Изменение потенциальной энергии внешних сил здесь будет равна с обратным знаком работе продольных усилий (напряжений  $\sigma_x$ ), возникающих в оболочке и стрингерах, на сближении торцов оболочки и стрингеров  $\Delta L$  при деформировании (изгибе) системы:

$$A_o = - \int_0^{2\pi R} \sigma_x h \Delta L dy = - \frac{\sigma_x h}{2} \int_0^L \int_0^{2\pi R} \left( \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 dx dy; \quad (8)$$

$$A_c = - \frac{F_c}{2} \sum_{i=1}^{k_c} \int_0^L \left[ \sigma_x \left( \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 \right]_{y=y_i} dx. \quad (9)$$

Сложив выражения (5) – (9), получим выражение полной потенциальной энергии системы, состоящей из оболочки и ребер, через перемещения срединной поверхности оболочки  $u, v$  и  $w$ .

Кинетическая энергия радиального движения системы, состоящей из оболочки и ребер, и с учетом равенства перемещений оболочки и ребер имеет вид:

$$K = \frac{\rho_o h}{2} \int_0^L \int_0^{2\pi R} \left( \frac{\partial w}{\partial t} \right)^2 dx dy + \frac{\rho_c F_c}{2} \sum_{i=1}^{k_c} \int_0^L \left( \frac{\partial w}{\partial t} \right)^2 \Big|_{y=y_i} dx + \frac{\rho_{uu} F_{uu}}{2} \sum_{j=1}^{k_{uu}} \int_0^{2\pi R} \left( \frac{\partial w}{\partial t} \right)^2 \Big|_{x=x_j} dy, \quad (10)$$

где:  $\rho_c, \rho_{uu}$  – плотности материалов стрингеров и шпангоутов.

Расположив начало координат в торце элемента на оси одного из стрингеров, примем выражения для аппроксимирующих функций перемещений, описывающих деформированное состояние ребристого цилиндрического оболочечного элемента и удовлетворяющих граничным условиям шарнирного опирания, в виде:

$$\begin{aligned} u &= \cos \frac{\pi m x}{L} \left[ a_1 \cos \frac{n y}{R} + a_2 \sin \frac{n y}{R} \right]; \\ v &= \sin \frac{\pi m x}{L} \left[ b_1 \sin \frac{n y}{R} + b_2 \cos \frac{n y}{R} \right]; \\ w &= \sin \frac{\pi m x}{L} \left[ c_1 \cos \frac{n y}{R} + c_2 \sin \frac{n y}{R} \right], \end{aligned} \quad (11)$$

где:  $m$  – число полуволн вдоль образующей оболочки (оси  $x$ );  $n$  – число полных волн вдоль окружности оболочки;  $a_i, b_i, c_i$  – неизвестные параметры перемещений.

Взяв производные от кинетической и полной потенциальной энергий со-

гласно уравнению Лагранжа второго рода (1) с учетом аппроксимации (11), получим две независимые системы уравнений относительно постоянных аппроксимации  $a_1, b_1, c_1$ , и  $a_2, b_2, c_2$  вида:

$$\left\{ \begin{array}{l} A_{11}a_1 + A_{12}b_1 + A_{13}c_1 = 0; \\ A_{21}a_1 + A_{22}b_1 + A_{23}c_1 = 0; \\ A_{30} \frac{d^2 c_1}{dt^2} + A_{31}a_1 + A_{32}b_1 + A_{33}c_1 = 0; \end{array} \right. \left\{ \begin{array}{l} B_{11}a_2 + B_{12}b_2 + B_{13}c_2 = 0; \\ B_{21}a_2 + B_{22}b_2 + B_{23}c_2 = 0; \\ B_{30} \frac{d^2 c_2}{dt^2} + B_{31}a_2 + B_{32}b_2 + B_{33}c_2 = 0. \end{array} \right. \quad (12)$$

Первая из них описывает симметричное, а вторая – кососимметричное деформирование подкрепленной оболочки. В виду полной идентичности этих систем уравнений дальнейшие преобразования будем выполнять для одного ( $i$ -го) типа деформирования.

Выразив  $a_i, b_i$  через параметр  $c_i$ , соответствующий прогибам в нормальном к срединной поверхности оболочки направлении, и подставив эти выражения в дифференциальное уравнение, приведем каждую из систем уравнений к одному дифференциальному уравнению движения оболочки вида:

$$\frac{d^2 c_i}{dt^2} + \omega_{mn}^2 \left( 1 - \frac{\sigma_x}{\sigma_{mn}} \right) c_i = 0 \quad (13)$$

где:  $\sigma_x$  – напряжения осевого сжатия, соответствующие действующей нагрузке;  $\omega_{mn}$  – частота свободных колебаний, отвечающая рассматриваемой форме деформирования оболочки;  $\sigma_{mn}$  – соответствующие этой форме деформации статические критические напряжения осевого сжатия.

**Решение задачи динамической устойчивости.** Для решения задачи динамической устойчивости необходимо определить время действия и соответствующее значение нагрузки, при которых становится возможным интенсивное развитие прогибов или интенсивное возрастание скорости деформирования. Выполним преобразование уравнения движения(13).

Введем обозначение  $t = \tau + \frac{\sigma_{mn}}{\gamma}$ , где  $\frac{\sigma_{mn}}{\gamma}$  – время, необходимое для того, чтобы напряжения достигли статических критических напряжений, соответствующих рассматриваемому волнообразованию.

Тогда уравнение (13) можно преобразовать к виду:

$$\frac{d^2 c_i}{d\bar{\tau}^2} - d_{mn} \bar{\tau} c_i = 0, \quad (14)$$

где:  $d_{mn} = \frac{\omega_{mn}^2 \sigma_s^3}{\sigma_{mn} \gamma^2}$ ;  $\bar{\tau} = \frac{\gamma \tau}{\sigma_s}$  – безразмерный параметр времени, прошедшего после

достижения осевыми напряжениями  $\sigma_x$  значения статических критических напряжений  $\sigma_{mn}$ ;  $\sigma_s$  – минимальное значение (эйлерово) статических критических напряжений.

Решение уравнения (14) можно получить в виде степенных рядов по степеням куба  $\bar{\tau} \sqrt[3]{d_{mn}}$ . Поскольку куб величины начинает сильно возрастать после того, когда она достигает значения, равного единице, за критерий динамиче-

ской потери устойчивости, определяющий начало интенсивного развития прогибов, в работе [2] предложено принять условие:

$$\bar{\tau} \sqrt[3]{d_{mn}} = 1. \quad (15)$$

Применение этого критерия позволяет получить для рассматриваемой формы изгиба критическое время, выражения для динамического критического напряжения и коэффициента динамичности, представляющего собой отношение динамического критического напряжения для данной формы изгиба рассматриваемого оболочечного элемента к его эйлеровому статическому критическому напряжению

$$k_{\delta mn} = \frac{\sigma_{\delta mn}}{\sigma_{\delta}} = \frac{1}{\sqrt[3]{d_{mn}}} + \frac{\sigma_{mn}}{\sigma_{\delta}} = \frac{1}{\sigma_{\delta}} \sqrt[3]{\frac{\sigma_{mn} \gamma^2}{\omega_{mn}^2}} + \frac{\sigma_{mn}}{\sigma_{\delta}}. \quad (18)$$

Динамическое критическое напряжение  $q_{\delta kr}$  и отвечающая ему величина коэффициента динамичности  $k_{\delta}$ , соответствующие потере устойчивости оболочечного элемента при динамическом нагружении, определяется путем минимизации полученных выражений по параметрам волнообразования  $m$  и  $n$ .

**Примеры расчетов.** На основе полученных зависимостей выполним расчет изотропной цилиндрической оболочки радиусом  $R = 120$  мм, длиной  $L = 300$  мм и толщиной оболочки  $h = 0,3$  мм ( $R / h = 400$ ) при отсутствии подкрепления и с двумя вариантами подкрепления: только 60 стрингерами и 60 стрингерами и двумя шпангоутами. Скорость возрастания осевых сжимающих напряжений  $\gamma$  принимается в пределах от  $1 \cdot 10^4$  до  $2 \cdot 10^6$  МПа/с. Ребра приняты в виде уголков с размерами: стрингера –  $\perp 2,5 \times 2,5 \times 0,3$  мм (располагаются с внешней стороны оболочки), шпангоуты –  $\perp 5,0 \times 2,5 \times 0,3$  мм (располагаются с внутренней стороны оболочки с равным шагом ( $l_0 = l_{uu}$ ) и присоединяются к оболочке большей полкой). Материал оболочки и ребер – АМГ ( $E = 6,67 \cdot 10^4$  МПа,  $\rho_o = \rho_{uu} = 0,26 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>).

Результаты вычисления динамических критических напряжений, коэффициентов динамичности и соответствующих им параметров волнообразования в зависимости от скорости нагружения  $\gamma$  для неподкрепленной (гладкой) и подкрепленной оболочек приведены в таблице.

Таблица

$\gamma$ , МПа/с	$1 \cdot 10^3$	$5 \cdot 10^4$	$1 \cdot 10^5$	$5 \cdot 10^5$	$1 \cdot 10^6$	$2 \cdot 10^6$
Гладкая оболочка ( $q_{\delta} = 1028,84$ МПа, $n = 0$ , $m = 29$ )						
$k_{\delta}$	1,014	1,040	1,064	1,185	1,292	1,459
$n$	0	0	0	0	0	0
$m$	29	29	29	30	30	31
Стрингерная оболочка ( $k_c = 60$ ) ( $q_{\delta} = 1346,69$ МПа, $n = 7$ , $m = 1$ )						
$k_{\delta}$	1,147	1,425	1,584	2,188	2,313	2,505
$n$	7	10	10	30	30	30
$m$	1	2	2	25	26	27
Оболочка с перекрестной системой ребер ( $k_c = 60$ ; $k_{uu} = 2$ ) ( $q_{\delta} = 1813,42$ МПа, $n = 7$ , $m = 1$ )						
$k_{\delta}$	1,053	1,154	1,244	1,663	1,754	1,896
$n$	10	12	12	30	30	30
$m$	2	3	3	24	27	27

**Выводы.** Анализ результатов расчетов позволяет сделать следующие выводы. Критические напряжения для подкрепленных оболочек существенно выше, чем для гладкой оболочки. Величины динамических критических напряжений (коэффициентов динамичности) растут с возрастанием скорости нагружения, и могут существенно (в несколько раз) превышать статические критические напряжения. При этом изменяются и формы волнообразования оболочечных элементов. Для подкрепленных оболочечных элементов возможно скачкообразное возрастание числа волн, соответствующее переходу к качественно новым случаям деформации. Например, для оболочки, подкрепленной перекрестной системой ребер, при достижении скоростью возрастания нагрузки величины  $\gamma = 5 \cdot 10^5$  МПа/с деформирование изменилось от общего случая деформирования с  $n = 10$  и  $m = 2$ , когда ребра и изгибаются, и закручиваются, к форме деформирования с  $n = 30$ ,  $m = 24$ , когда ребра обоих направлений только закручиваются. Изложенное свидетельствует о том, что подкрепление элементов существенно повышает их несущую способность и что с ростом скоростей нагружения влияние дискретности расположения ребер возрастает.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Власов, В. З. Общая теория оболочек и ее приложение в технике / В. З. Власов. – М.-Л. : ГИТЛ, 1949. – 784 с.
2. Амиро И. Я., Заруцкий В. А. Теория ребристых оболочек. – К. : Наук. Думка, 1980. – 368 с. – (Методы расчета оболочек : В 5-ти т. ; Т. 2).

УДК 62-233.3

#### ПРИМЕНЕНИЕ СОВРЕМЕННОГО ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ РАСЧЕТА ЗУБЧАТЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ПЕРЕДАЧ

**С. В. Монтик**

Брестский государственный технический университет,  
г. Брест, Республика Беларусь

Цилиндрические зубчатые передачи широко используются в различных приводах машин, оборудовании, оснастки и приборов благодаря своей простоте и технологичности, малым габаритам, высокому КПД, постоянству передаточного отношения, возможности применения в широком диапазоне вращающих моментов, скоростей и передаточных отношений, надежности. Около 80 % от общего числа зубчатых передач в машиностроении приходится на эвольвентные цилиндрические передачи. В связи с этим возникает задача проектирования зубчатых цилиндрических передач, которые удовлетворяют требованиям повышенной прочности, долговечности, износостойкости и плавности работы. При проектировании зубчатых передач необходимо обеспечить расчет их геометрических и прочностных параметров в соответствии с действующими стандартами (ГОСТ 16532-70 [1] и ГОСТ 21354-87 [2]), а также разработку рабочих чертежей в соответствии с требованиями ЕСКД.

С целью автоматизации процесса проектирования и расчета, разработки трехмерных моделей и рабочих чертежей зубчатых передач рассмотрим возможность применения такого современного программного обеспечения как российская импортнезависимая система трехмерного проектирования КОМПАС-3D V21 ООО «АСКОН - Системы проектирования» с приложениями «Валы и механические передачи 3D», «Валы и механические передачи 2D», в состав которых входит модуль КОМПАС-GEARS. Система КОМПАС-3D представляет собой САД-систему с некоторыми возможностями и средствами CAE и САМ-систем.

Модуль расчета механических передач КОМПАС-GEARS позволяет выполнять расчет зубчатые цилиндрических эвольвентные передачи с постоянным передаточным отношением. Можно последовательно выполнить геометрический расчет, расчет на прочность и расчет на выносливость, а также проектный и восстановительный расчет.

При выполнении проектного расчета определяется параметры зубчатой передачи в зависимости от заданных условий ее работы. Проектный расчет возможен: 1) по заданному межосевому расстоянию и передаточному отношению; 2) по числам зубьев передачи. Использование первого варианта возможно, например, при проектировании редукторов общемашиностроительного назначения, для которых задается стандартные значения межосевых расстояний и передаточных отношений. Второй вариант возможен при проектировании коробок скоростей, привода подач, когда первоначально определяется передаточное отношение, числа зубьев, а затем выполняется прочностной расчет зубчатой передачи. Расчет осуществляется методом дискретного поиска. В результате будут предложено до 15 вариантов параметров передачи, обеспечивающих прочность и планируемый ресурс работы при заданной циклограмме нагружения, заданном материале и наложенных геометрических ограничениях. Результаты проектного расчета для заданных чисел зубьев представлены на рисунке 1. Рекомендуется при рассчитанном очень большом ресурсе передачи задавать коэффициентам ограничения усталостных повреждений, равным нулю (по умолчанию 0,6), при этом в расчете эквивалентных напряжений будут учтены все нагрузки.

В дальнейшем для выбранного варианта последовательно выполняются геометрический расчет, расчет на прочность и долговечность, результаты которых можно экспортировать в различные форматы, а также создать 3D-модели зубчатых колес, рабочие чертежи зубчатых колес с таблицей с параметрами по ГОСТ 2.403-75.

Выбор оптимальных вариантов зубчатой передачи методом дискретного поиска

Старт поиска    Просмотр результатов расчётов выбранного варианта    Ввод геометрических ограничений поиска

Параметры передачи :  $z_1 = 18$ ,  $z_2 = 76$ , исходный контур по ГОСТ 13755-2015

Модуль, мм	Ширина зубчатого венца, мм	Угол наклона зубьев	Коэффициенты смещения исходного контура		Межосевое расстояние, мм	Объем занимаемый зубчатых колёсами, см <sup>3</sup> $V = \pi \cdot (d_{a1}^2 + d_{a2}^2) \cdot b$	Результаты прочностного расчёта на долговечность				Результаты прочностного расчёта при действии максимальной нагрузки																																
			Коэффициенты запаса				Ресурс передачи, час		Коэффициенты запаса		Ресурс передачи, час																																
			контакт	изгиб			контакт	изгиб	контакт	изгиб																																	
$m_n$	$b$	$\beta$	$x_1$	$x_2$	$a_w$		$\sigma_{H1}$	$\sigma_{H2}$	$\sigma_{FE1}$	$\sigma_{FE2}$	$L_H$	$\sigma_{H1}$	$\sigma_{H2}$	$\sigma_{F1}$	$\sigma_{F2}$																												
1	3.25	89.9	30°	0.1432	0.9214	179.67	6637.1	1.621	1.062	2.42	3.542	15336	1.936	1.659	11.089	10.112																											
2	3.5	91.7	24°	0.2362	1.0326	184.23	7120.1	1.54	1.008	2.068	3.008	11241	1.839	1.576	9.527	8.636																											
3	3.5	80.8	33°	0.102	0.7312	198.96	7305.6	1.61	1.055	2.013	2.922	14705	1.923	1.648	9.278	8.389																											
4	3.75	96.3	21°	0.2431	1.1782	193.73	8279.2	1.556	1.019	2.149	3.155	11974	1.858	1.592	9.955	9.104																											
							<table border="1"> <thead> <tr> <th>Наименование расчётного параметра (расчёт на долговечность)</th> <th>Обозначение</th> <th>Ведущее колесо</th> <th>Ведомое колесо</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Допускаемые напряжения по контакту, МПа</td> <td><math>\sigma_{HP}</math></td> <td>954.55</td> <td>581.82</td> </tr> <tr> <td>Эквивалентные напряжения по контакту, МПа</td> <td><math>\sigma_{HE}</math></td> <td>613.53</td> <td>570.9</td> </tr> <tr> <td>Допускаемые напряжения по изгибу, МПа</td> <td><math>\sigma_{FP}</math></td> <td>277.63</td> <td>287.91</td> </tr> <tr> <td>Эквивалентные напряжения по изгибу, МПа</td> <td><math>\sigma_{FE}</math></td> <td>129.18</td> <td>91.27</td> </tr> <tr> <td>Ресурс по контакту, час</td> <td><math>L_H</math></td> <td>195184</td> <td>11974</td> </tr> <tr> <td>Ресурс по изгибу, час</td> <td><math>L_F</math></td> <td>50840370</td> <td>10059703</td> </tr> </tbody> </table>									Наименование расчётного параметра (расчёт на долговечность)	Обозначение	Ведущее колесо	Ведомое колесо	Допускаемые напряжения по контакту, МПа	$\sigma_{HP}$	954.55	581.82	Эквивалентные напряжения по контакту, МПа	$\sigma_{HE}$	613.53	570.9	Допускаемые напряжения по изгибу, МПа	$\sigma_{FP}$	277.63	287.91	Эквивалентные напряжения по изгибу, МПа	$\sigma_{FE}$	129.18	91.27	Ресурс по контакту, час	$L_H$	195184	11974	Ресурс по изгибу, час	$L_F$	50840370	10059703
Наименование расчётного параметра (расчёт на долговечность)	Обозначение	Ведущее колесо	Ведомое колесо																																								
Допускаемые напряжения по контакту, МПа	$\sigma_{HP}$	954.55	581.82																																								
Эквивалентные напряжения по контакту, МПа	$\sigma_{HE}$	613.53	570.9																																								
Допускаемые напряжения по изгибу, МПа	$\sigma_{FP}$	277.63	287.91																																								
Эквивалентные напряжения по изгибу, МПа	$\sigma_{FE}$	129.18	91.27																																								
Ресурс по контакту, час	$L_H$	195184	11974																																								
Ресурс по изгибу, час	$L_F$	50840370	10059703																																								
5	3.75	76.5	32°	0.1114	0.7653	210.99	7782.4	1.597	1.046	2.061	2.99	14024	1.908	1.635	9.548	8.631																											
6	4	97.5	10°	0.3423	1.3056	196.87	8655.4	1.589	1.041	1.994	2.895	13602	1.898	1.627	9.284	8.398																											
7	4	98.4	11°	0.3374	1.3555	197.64	8803.3	1.597	1.046	2.04	2.969	13990	1.907	1.634	9.498	8.611																											
8	4	59.2	33°	0.0751	0.7855	227.48	7003.8	1.609	1.054	2.182	3.174	14673	1.922	1.647	10.156	9.206																											
9	4.25	76.6	0°	0.3559	1.3094	206.13	7456.9	1.665	1.091	1.966	2.851	17988	1.989	1.704	9.192	8.307																											
10	4.25	76.6	0°	0.3559	1.3094	206.13	7456.9	1.665	1.091	1.966	2.851	17988	1.989	1.704	9.192	8.307																											
11	4.25	60.1	29°	0.1213	0.9753	232.81	7459.1	1.642	1.076	2.436	3.568	16548	1.961	1.681	11.391	10.397																											
12	4.25	55.1	31°	0.0914	0.9014	237.07	7087.7	1.635	1.071	2.371	3.465	16137	1.953	1.674	11.086	10.096																											
13	4.5	66	0°	0.3489	1.3446	218.36	7212.4	1.662	1.089	2.036	2.959	17786	1.985	1.701	9.562	8.661																											

Выбрать вариант и перейти к выполнению геометрического расчёта    Отмена

Рисунок 1 – Результаты проектного расчета в модуле КОМПАС-GEARS

Геометрический расчет зубчатой передачи возможен для следующих вариантов: по межосевому расстоянию (по заданному межосевому расстоянию  $a_w$  определяется суммарный коэффициент смещения  $x_\Sigma$ , значение которого разби-

вается на  $x_1$  и  $x_2$ ); по коэффициентам смещения  $x_1$  и  $x_2$  (по коэффициентам смещения  $x_1$  и  $x_2$  определяется межосевое расстояние  $a_w$ ; начальные значения коэффициентов смещения можно задать в соответствии с рекомендациями ГОСТ 16532-70 либо по рассчитать при помощи специальной методики).

При вводе исходных данных при выборе модуля можно выбрать следующие варианты исходного контура: крупномодульные передачи с исходным контуром по ГОСТ 13755-2015 [3]; мелкомодульные передачи с исходным контуром по ГОСТ 9587-81; крупномодульные высоконапряженные передачи с исходным контуром по ГОСТ Р 50531-93; метрические модули (исходный контур по стандартам других стран); питчевые модули (исходный контур по стандартам других стран); двойной диаметральный (дробный) питч по стандарту фирмы Феллоу (USA); нестандартный модуль или (и) нестандартный исходный контур.

При выполнении геометрического расчета возможно выбрать и задать коэффициенты смещения. Одним из вариантов является расчет коэффициентов смещения по многокритериальной методике оптимизации зубчатого зацепления (см. рисунок 2), которая заключается в поиске множества решений (значений коэффициентов смещений  $x_1$  и  $x_2$  и параметров работоспособности передачи) для всех возможных сочетаний следующих критериев: 1) контактной прочности (запасу прочности по контактным напряжениям); 2) прочности по изгибу (запасу прочности по изгибным напряжениям); 3) равнопрочности по изгибу зубьев ведомого и ведущего колеса; 4) износостойкости и наибольшему сопротивлению заеданию; 5) плавности работы передачи. При этом используется и строится интерактивный блокирующий контур (см. рис.3), используя который пользователь может выбрать требуемые коэффициенты смещения. Блокирующий контур зубчатой передачи – это область сочетаний коэффициентов смещения  $x_1$  и  $x_2$ , ограниченная линиями геометрических и качественных показателей. Суть блокирующего контура состоит в том, чтобы на плоскости координат  $x_1$  и  $x_2$  показать границы, внутри которых будет обеспечена кинематически правильная работа зубчатой передачи. Более подробно данная методика описана в работе [4] и в ГОСТ 16532-70 [1].

Расчет и выбор коэффициентов смещения

Параметры передачи:  $\gamma_1 = 18^\circ$ ,  $\gamma_2 = 76^\circ$ ,  $m_n = 4$ ,  $\alpha = 20^\circ$ ,  $\beta = 8^\circ 19' 14''$ ,  $b_1 = 70$ ,  $b_2 = 60$ ,  $a_n = 190$ ,  $x_2 = 0$ . Расчетная нагрузка:  $T_{зад} = 278 \text{ Н} \cdot \text{м}$ ,  $n_1 = 177 \text{ об/мин}$

Ограничения:  $s_{H1} \geq 0.4 \cdot m_n$ ,  $s_{H2} \geq 0.4 \cdot m_n$ ,  $e_a \geq 1$

По рекомендациям ГОСТ 16532-70 (Приложение 2) для кинематически передат  Ввод вручную

$x_1 = 0$ ,  $x_2 = 0$   $x_1 = 0.2918$ ,  $x_2 = -0.2918$   Значения в зоне блокирующего контура

По рекомендациям ГОСТ 16532-70 (Приложение 2) для силовых передат  По рекомендациям ISO

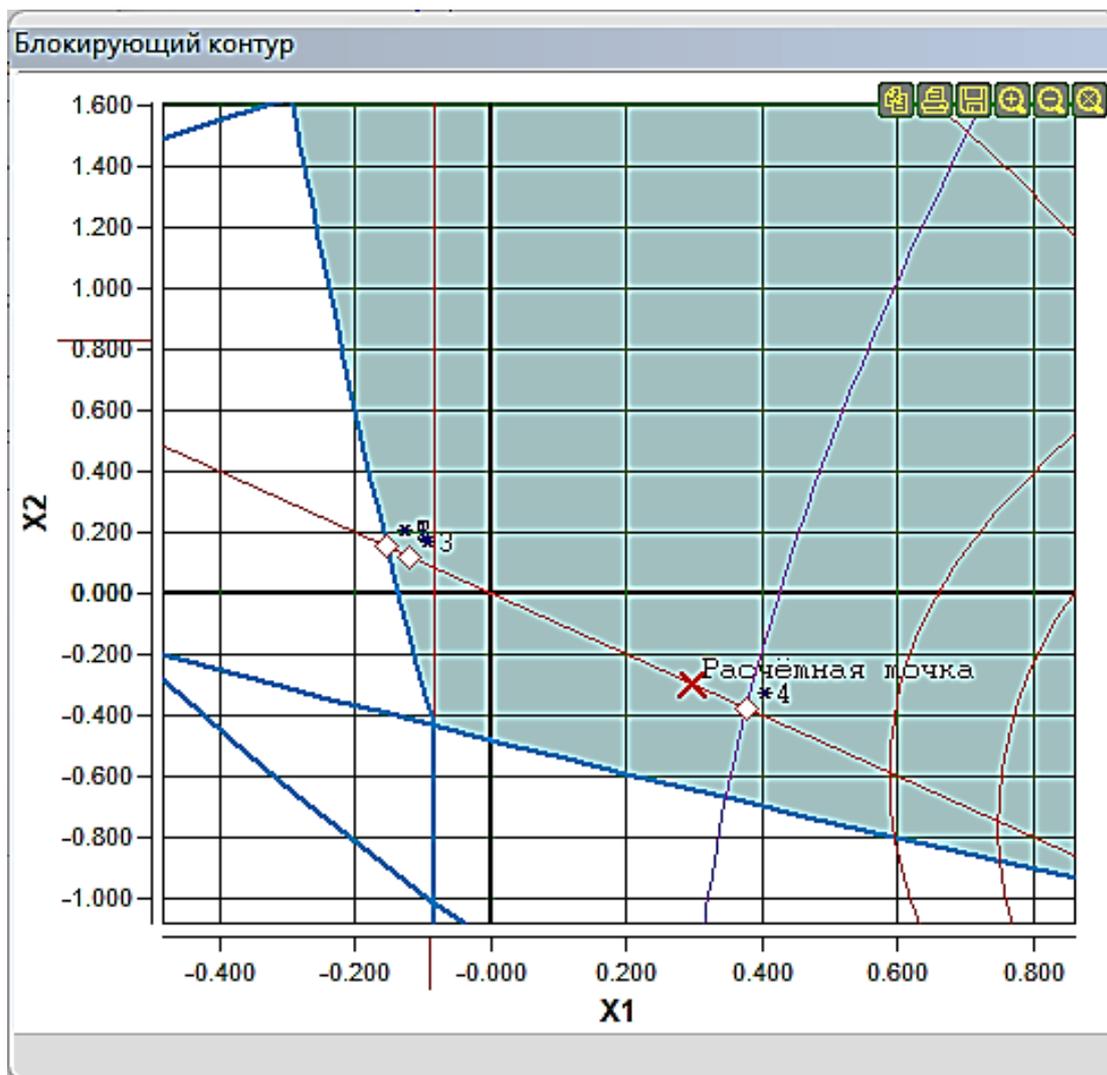
$x_1 = 0.3$ ,  $x_2 = -0.3$   $x_1 = 0.36$ ,  $x_2 = -0.36$

По методике многокритериальной оптимизации зубчатого зацепления (автор – Голованев В.А.) (Вес критериев примет одинаковый)

Критерии оптимизации	Коэффициенты смещения				Коэффициенты запаса прочности				Удельное соотношение профилей зубьев в миним. точках активных профилей		Коэффициент трения	Нормальная толщина зуба на поверхности вершин	Угол зацепления	Межосевое расстояние	Диаметр вершин				
	*1	*2	*3	*4	$\mu_{H1}$	$\mu_{H2}$	$\mu_{F1}$	$\mu_{F2}$	$\theta_{12}$	$\theta_{21}$					$\epsilon_{\alpha}$	$\rho_{n1}$	$\rho_{n2}$	$a_w$	$d_{a1}$
1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0.2918	-0.2918	1.474	1.263	7.083	5.757	-1.9453	-1.3889	1.579	2.233	3.299	190	83.133	312.867	
☐ Тип зацепления: По рекомендациям ГОСТ и ISO (3)																			
2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0	0	1.527	1.308	6.768	6.392	-6.9596	-1.0673	1.6498	2.744	3.193	20°11'44"	190	80.766	315.234
3	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0.3	-0.3	1.472	1.262	7.088	5.749	-1.9172	-1.3936	1.5778	2.225	3.3	20°11'44"	190	83.166	312.834
4	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0.36	-0.36	1.462	1.253	7.163	5.626	-1.5638	-1.4603	1.5607	2.105	3.316	20°11'44"	190	83.646	312.354
☐ Тип зацепления: По методике (30)																			
5	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	0.2958	-0.2958	1.473	1.263	7.082	5.757	-1.9453	-1.3889	1.579	2.233	3.299	20°11'44"	190	83.132	312.868
6	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	0.2959	-0.2959	1.473	1.263	7.083	5.757	-1.9449	-1.389	1.5789	2.233	3.299	20°11'44"	190	83.133	312.867
7	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	-0.12	0.12	1.548	1.327	6.66	6.661	-20.4387	-0.9395	1.6721	2.912	3.138	20°11'44"	190	79.806	316.194
8	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	-0.153	0.153	1.554	1.332	6.632	6.735	-38.0224	-0.9046	1.6775	2.954	3.121	20°11'44"	190	79.542	316.458
9	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	0.3763	-0.3763	1.459	1.25	7.184	5.993	-1.4806	-1.4786	1.5559	2.071	3.32	20°11'44"	190	83.776	312.224
10	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	0.3765	-0.3765	1.459	1.25	7.184	5.993	-1.4798	-1.4787	1.5559	2.071	3.32	20°11'44"	190	83.778	312.222
11	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	-0.153	0.153	1.554	1.332	6.632	6.735	-38.0224	-0.9046	1.6775	2.954	3.121	20°11'44"	190	79.542	316.458
12	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	0.2958	-0.2958	1.473	1.263	7.083	5.757	-1.9452	-1.3889	1.579	2.233	3.299	20°11'44"	190	83.132	312.868
13	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	0.2959	-0.2959	1.473	1.263	7.083	5.757	-1.9448	-1.389	1.5789	2.233	3.299	20°11'44"	190	83.133	312.867
14	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	-0.12	0.12	1.548	1.327	6.66	6.661	-20.4387	-0.9395	1.6721	2.912	3.138	20°11'44"	190	79.806	316.194
15	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	-0.12	0.12	1.548	1.327	6.66	6.661	-20.4387	-0.9395	1.6721	2.912	3.138	20°11'44"	190	79.806	316.194
16	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	0.3764	-0.3763	1.459	1.25	7.184	5.993	-1.4804	-1.4786	1.5559	2.071	3.32	20°11'44"	190	83.777	312.223
17	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	0.3765	-0.3765	1.459	1.25	7.184	5.993	-1.4796	-1.4788	1.5559	2.071	3.32	20°11'44"	190	83.778	312.222
18	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	-0.153	0.153	1.554	1.332	6.632	6.735	-38.0224	-0.9046	1.6775	2.954	3.121	20°11'44"	190	79.542	316.458
19	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	-0.1532	0.1532	1.554	1.332	6.631	6.736	-38.245	-0.9044	1.6776	2.954	3.121	20°11'44"	190	79.54	316.46
20	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	0.2958	-0.2958	1.473	1.263	7.083	5.757	-1.945	-1.389	1.5789	2.233	3.299	20°11'44"	190	83.133	312.867

\*1) Контактная прочность  
\*2) Прочность по изгибу  
\*3) Равнопрочность по изгибу зубьев ведущего и ведомого колеса  
\*4) Износостойкость и наибольшее сопротивление заеданию (бесразмерные удельные соотношения в миним. точках активных профилей зубьев)  
\*5) Плавность работы (максимальное значение коэффициента перекрытия)

Рисунок 2 – Результаты расчета коэффициентов смещения по многокритериальной методике оптимизации зубчатого зацепления



**Рисунок 3 – Интерактивный блокирующий контур**

После выполнения геометрического расчета необходимо выполнить расчет на прочность при действии максимальной нагрузки (задается крутящий момент и частота вращения). После выполнения расчета на прочность выполняется расчет на долговечность, для которого задается планируемый ресурс работы передачи (в часах) и режимы нагружения в виде циклограммы крутящий момент – частота вращения для ведущего колеса, продолжительности работы на каждом режиме.

Приложение «Валы и механические передачи 2D» интегрировано с приложением «Оптимизация IOSO-K», разработанным компанией «СИГМА Технология». Средствами приложения можно оптимизировать параметры цилиндрической зубчатой передачи внешнего зацепления с учетом различных значений параметров исходного контура и коэффициентов смещения. Запуск процесса оптимизации инициируется при выборе модуля и исходного контура передачи, если указан вариант «Нестандартный исходный контур». В данной статье оптимизация IOSO-K не рассматривается.

Проведенный анализ приложений «Валы и механические передачи 3D», «Валы и механические передачи 2D» системы трехмерного проектирования КОМПАС-3D V21 показал широкие возможности для выполнения проектных

расчетов, а также геометрических и прочностных расчетов зубчатых цилиндрических передач в соответствии с действующими стандартами, а также разработки 3D-моделей и рабочих чертежей в соответствии с требованиями ЕСКД. При этом используются различные методы оптимизации геометрических параметров зубчатых передач.

Однако нужно отметить, что в рассмотренных выше приложениях не предусмотрено выполнении проектировочных расчетов на контактную выносливость для определения ориентировочного диаметра начальной окружности шестерни или межосевого расстояния передачи, а также проектировочных расчетов на выносливость зубьев при изгибе для определения ориентировочного значения модуля по методикам, изложенным в ГОСТ 21354-87.

Также при выполнении проектировочных расчетов не всегда возможно задать циклограмму работы передачи. В ряде случаев удобно использовать типовые режимы нагружения, однако возможности ввода режимов нагружения в таком виде не предусмотрено.

При выполняемом проектном расчете с использованием метода дискретного поиска в некоторых случаях угол наклона зубьев превышает рекомендованные значения для косозубой передачи. Ограничения по данному параметру на задаются.

Несмотря на указанные выше особенности системы трехмерного проектирования КОМПАС-3D с приложениями «Валы и механические передачи 3D», «Валы и механические передачи 2D», целесообразно использовать в учебном процессе при изучении учебной дисциплины «Детали машин» и выполнении курсового проекта по данной дисциплине у студентов механических специальностей.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Передачи зубчатые цилиндрические эвольвентные внешнего зацепления. Расчет геометрии: ГОСТ 16532-70. – М. : Изд-во стандартов, 1983. – 41 с.
2. Передачи зубчатые цилиндрические эвольвентные внешнего зацепления. Расчет на прочность: ГОСТ 21354-87. – М. : Изд-во стандартов, 1988. – 127 с.
3. Основные нормы взаимозаменяемости. Передачи зубчатые цилиндрические эвольвентные. Исходные контуры: ГОСТ 13755-2015. – М. : Стандартинформ, 2016. – 15 с.
4. Голованев, В. А. Применение оптимизационных методов и интерактивного блокирующего контура при выборе коэффициентов смещения (корригировании) цилиндрических эвольвентных зубчатых передач внешнего зацепления // САПР и графика. – 2014. – № 11. – С. 2–6 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://sapr.ru/article/24715>. – Дата доступа: 17.08.2023.

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИНТЕГРАЛЬНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ДЛЯ ФОРМАЛИЗАЦИИ ПРОЦЕССА МОНИТОРИНГА И ДИАГНОСТИКИ МНОГОВАЛЬНЫХ ЗУБЧАТЫХ ПРИВОДОВ

Парфиевич А.Н.<sup>1</sup>, Сокол В.А.<sup>1</sup>, Саливончик Ю.Н.<sup>1</sup>, Селивоник М.В.<sup>1</sup>

1) Брестский государственный технический университет;  
г. Брест, Республика Беларусь

**Введение.** В процессе эксплуатации многовальных приводов на основе цилиндрических прямозубых передач каждый из их элементов вносит свой вклад в формирование итогового анализируемого сигнала. В силу этого специалист-диагност сталкивается с большим объемом информации, которую необходимо проанализировать, и поэтому оперативность постановки диагноза будет напрямую зависеть от функциональных возможностей используемого диагностического оборудования и его опытности. Сокращение объема данных напрямую связано с уменьшением числа линий спектра анализируемого сигнала, что, в свою очередь, неизбежно приведёт к ухудшению разрешения и не позволит идентифицировать отдельные составляющие, которые могут нести в себе важную диагностическую информацию. Для повышения объективности процедуры диагностирования необходимо выделить перечень определённых информативных частотных составляющих, характеризующих состояние зубчатого колеса, и рассмотреть возможность их автоматического получения и обработки.

**Основная часть.** Как следует из ряда литературных источников [1,2,3,4], в составе спектра акустического сигнала можно выделить определённый перечень информативных частотных составляющих, отражающих фактическое состояние зубчатого колеса:

- частотные составляющие кратные частоте вращения элементов привода  $f_{вр}$ :

$$f_{врi} = k \cdot n_i / 60$$

$$n_i = n_{i-1} \frac{z_{i-1}}{z_i}, \quad (1)$$

где  $n_i$  – частота вращения  $i$ -го вала;

$z_{i-1}$ ,  $z_i$  – числа зубьев ведущего колеса предыдущего вала и ведомого колеса  $i$ -го вала;

$k$  – коэффициент, принимаемый 1, 2, 3 и т.д.

- частотные составляющие, соответствующие частоте пересопряжения зубьев всех зубчатых пар  $f_z$ , а также на кратных им частотах:

$$f_z = z_1 \cdot f_{1вр} = z_2 \cdot f_{2вр} \quad (2)$$

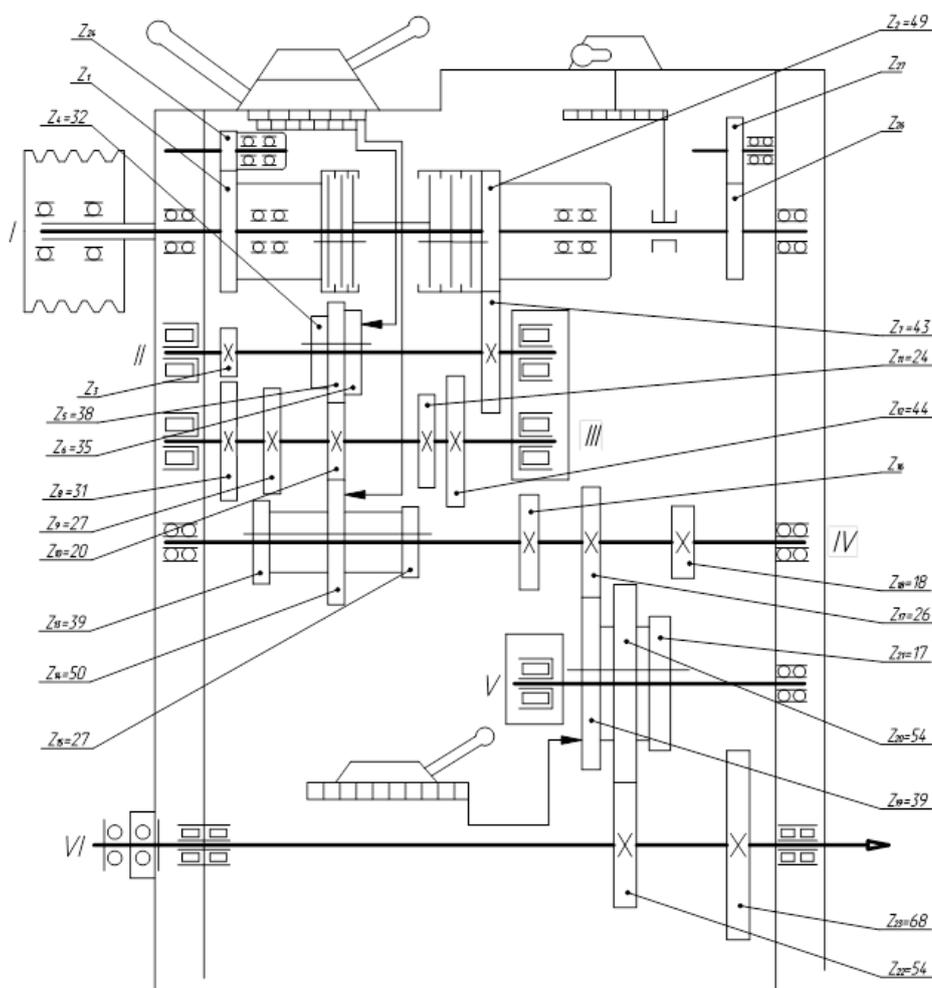
где  $z_1$ ,  $z_2$  – числа зубьев;

$f_{1вр}$ ,  $f_{2вр}$  – частоты вращения сопряженных колес.

- частотные составляющие, соответствующие колебаниям с комбинированными частотами  $m \cdot f_z \pm n \cdot f_0$ , возникающими вследствие различного рода модуляций сигнала ( $m, n=0,5;1;1,5;2$  и т.д.). Как правило, они появляются в окрестности  $f_{1z}$  и кратным ей гармоникам  $k \cdot f_{1z}$ , расположены симметрично относительно них и отстоят друг от друга на величину  $f_{вр}$ .

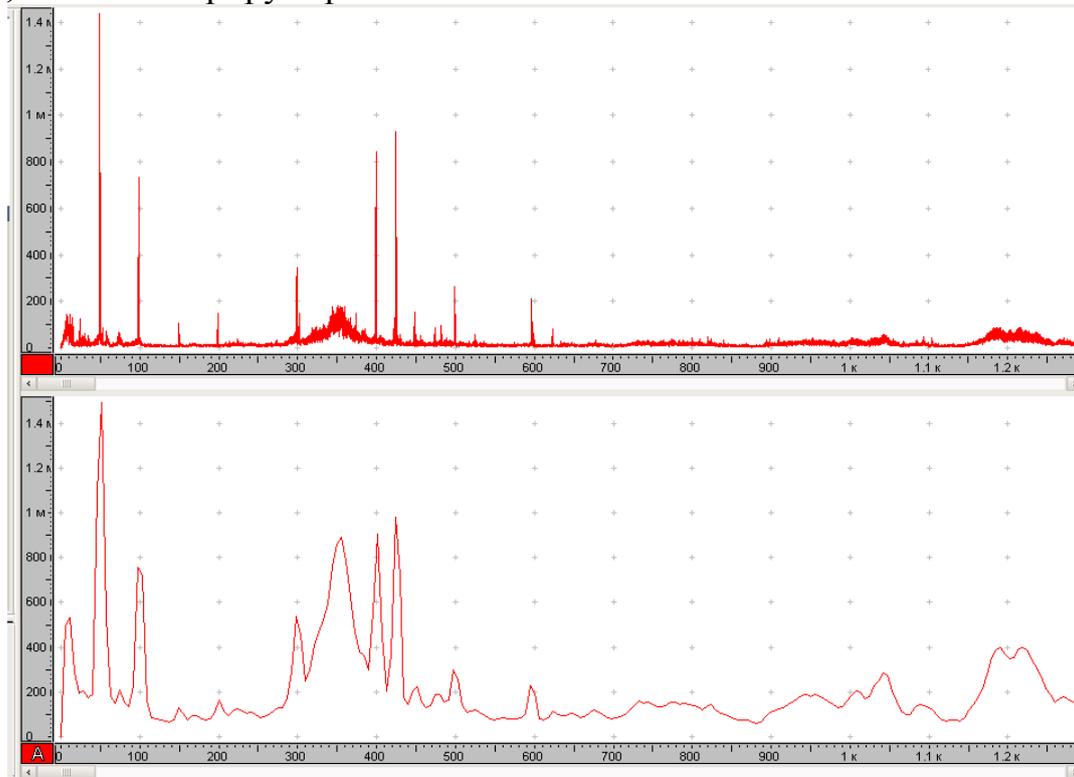
Математический аппарат получения данного перечня информативных частотных составляющих достаточно хорошо изучен, поэтому вычисление их было автоматизировано и реализовано в рамках используемого диагностического комплекса [5]. Возможность быстрого определения амплитуд колебаний на интересующих частотах позволяет оперативно формировать базу для последующего анализа и формализовать процесс применения диагностических признаков.

В ходе анализа кинематической схемы привода (рис. 1) выявлено, что две первые ступени участвуют в работе привода на различных передачах (частота вращения шпинделя 40, 80, 160 и 630  $\text{мин}^{-1}$ ). Так, при включении данных передач вращение с первого вала на второй осуществляется посредством зубчатой пары  $z=49/z=43$ , а со второго на третий -  $z=35/z=24$ .



**Рисунок 1 – Кинематическая схема коробки передач универсального токарного станка СН-401/501**

Применяя максимальное разрешение спектра акустического сигнала, его обработка вызывает определенные трудности ввиду чрезвычайно высокой насыщенности различными составляющими от всех элементов, находящихся в работе, что иллюстрирует рис. 2.



**Рисунок 2 – Фрагменты спектров акустического сигнала многовального зубчатого привода при использовании окна Ханна и числа линий спектра 524000 (сверху) и 8000 (снизу)**

Использование автоматизированных методов получения приведенных выше амплитуд гармонических составляющих, описанных в [5], позволило предложить и апробировать следующие интегральные показатели для оценки состояния элементов зубчатых приводов:

- соотношение суммы кратных зубцовых гармоник и гармоники на частоте пересопряжения зубьев  $K_z$ :

$$K_z = \frac{\sum_{i=2}^5 f_{zi}}{f_{z1}} \quad (3)$$

- соотношение суммы амплитуд боковых полос и гармоники зубцовой частоты  $K_{\text{бп}}$ :

$$K_{\text{бп}} = \frac{\sum_{n=-5}^5 f_z + nf_o}{f_z} \quad (4)$$

По результатам расчетов получены следующие данные, приведенные в таблицах 1 и 2.

Таблица 1 – Величины  $K_z$  на различных передачах для первых двух степеней привода

Вал	Частота вращения шпинделя $n = 80 \text{ мин}^{-1}$		Частота вращения шпинделя $n = 630 \text{ мин}^{-1}$		Частота вращения шпинделя $n = 160 \text{ мин}^{-1}$		Частота вращения шпинделя $n = 40 \text{ мин}^{-1}$	
	$\sum_{i=2}^5 f_{zi}$	$K_z$	$\sum_{i=2}^5 f_{zi}$	$K_z$	$\sum_{i=2}^5 f_{zi}$	$K_z$	$\sum_{i=2}^5 f_{zi}$	$K_z$
вал 1 вал 2	0,69	0,793	0,926	1,929	0,59	0,614	0,69	0,884
вал 2 вал 3	0,797	0,137	0,740	0,172	0,500	0,113	0,400	0,151

Таблица 2 – Величины  $K_{бп}$  для зубчатых колес первых двух ступеней привода на различных передачах

	Частота вращения шпинделя $n = 80 \text{ мин}^{-1}$		Частота вращения шпинделя $n = 630 \text{ мин}^{-1}$		Частота вращения шпинделя $n = 160 \text{ мин}^{-1}$		Частота вращения шпинделя $n = 40 \text{ мин}^{-1}$	
	$\sum_{n=5}^5 f_z + n f_o$	$K_{бп}$	$\sum_{n=5}^5 f_z + n f_o$	$K_{бп}$	$\sum_{n=5}^5 f_z + n f_o$	$K_{бп}$	$\sum_{n=5}^5 f_z + n f_o$	$K_{бп}$
ВАЛ 1 ведущее	0,23	0,27	0,5	0,521	0,48	1,000	0,301	0,386
ВАЛ 2 ведомое	1,075	1,25	0,99	1,031	0,56	1,167	0,675	0,865
ВАЛ 2 ведущее	1,318	0,23	0,82	0,186	1,62	0,377	0,595	0,225
ВАЛ 3 ведомое	1,163	0,20	0,96	0,218	1,39	0,323	0,845	0,320

По результатам расчета и анализа предлагаемых показателей, приведенных в таблицах и на графиках (рис. 3 и 4), можно сделать следующие выводы:

- величина показателя  $K_z$  для первой ступени передачи значительно превосходит аналогичный показатель для второй ступени на всех передачах, что свидетельствует о наличии в анализируемом сигнале гармоник на частотах, кратных зубцовой  $f_z$ . Причиной такого распределения амплитуд является возникновение локального дефекта отдельного зуба зубчатого колеса, т. е. с его развитостью возникает более интенсивный рост амплитуд на данных частотах.

- для установления, какое из колес первой ступени имеет сравнительно худшее состояние применен показатель  $K_{бп}$  (рисунок 3). Как следует из графика, величина примененного показателя имеет большее значение для ведомого колеса первой ступени, располагающегося на втором валу. Это свидетельствует о более высоких амплитудах боковых комбинационных частот  $m \cdot f_z \pm n \cdot f_o$  по отношению к амплитуде зубцовой гармоники  $f_z$ , генерируемых при работе данного колеса.

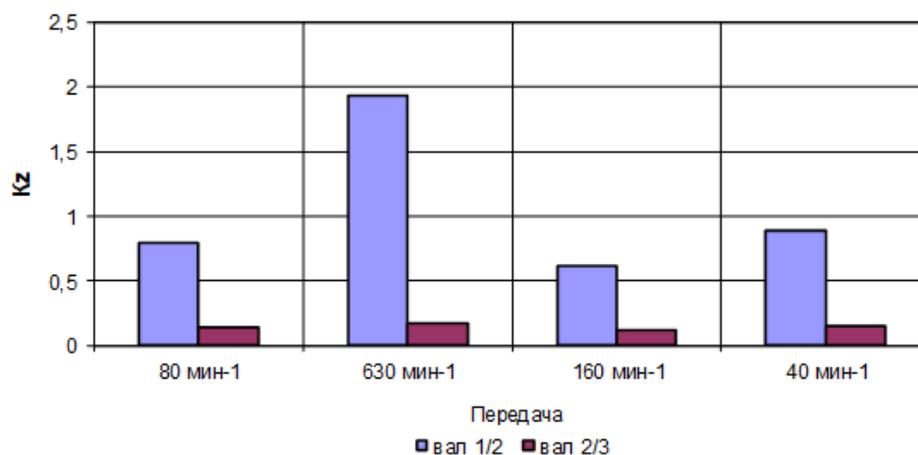


Рисунок 3 – Значения показателя  $K_z$  для двух первых ступеней на различных передачах

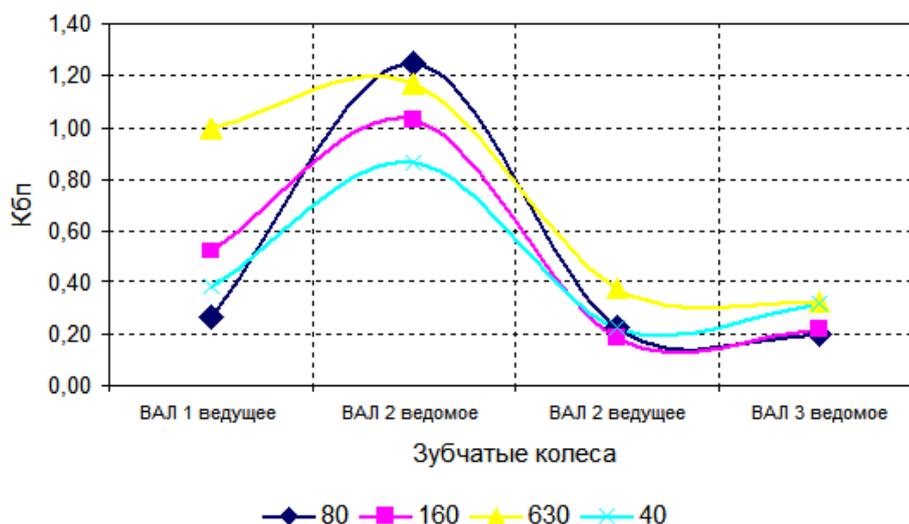


Рисунок 4 – Значения показателя  $K_{bp}$  для зубчатых колес двух первых ступеней на различных передачах

**Заключение.** Изменение величин приведенных выше показателей  $K_z$  и  $K_{bp}$  и абсолютных величин зубцовых  $f_z$  и комбинированных частотных составляющих  $m \cdot f_z \pm n \cdot f_0$  спектра акустического сигнала чувствительно к наличию и степени развитости локальных повреждений отдельных зубьев, при этом анализ приведенных выше  $K_z$  и  $K_{bp}$  менее трудоемок по сравнению с определением состава спектра и более предпочтителен при применении на натуральных объектах. Их использование позволяет формализовать процесс применения известных диагностических признаков при мониторинге состояния зубчатых колес многовальных приводов.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Генкин М.Д. и др. Вопросы акустической диагностики. В кн.: Методы виброизоляции машин и присоединенных конструкций // Наука, 1975. – С. 67-91.
2. Попков В.И. Виброакустическая диагностика в судостроении / В.И. Попков, Э.Л. Мишинский, О.И. Попков. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л. : Судостроение, 1989. – с. 256.

3. Русов В.А. Диагностика дефектов вращающегося оборудования по вибрационным сигналам // Вибро-центр, 2012. – С. 252.

4. Ширман А.Р. Практическая вибродиагностика и мониторинг состояния механического оборудования / А.Р. Ширман, А.Б. Соловьев. – М. : Наука, 1996. – 276 с.

5. Драган А.В., Стецко И.П., Ромашко Д.А., Левкович Н.В. Новые аппаратно-программные средства для исследования и диагностики механических систем // Вестник Брестского государственного технического университета. – 2006. – №4. – С. 17– 26.

УДК 631.3-1/-9

**АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА КОНТРОЛЯ ВЫСЕВА  
АГРЕГАТА ПОЧВООБРАБАТЫВАЮЩЕ-ПОСЕВНОГО  
МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОГО АППМ-6**

**С. В. Савчук, А. Н. Парфиевич, С. В. Монтик,  
Ю. Н. Саливончик, В. А. Сокол**

Брестский государственный технический университет,  
г. Брест, Республика Беларусь

В последние годы в агротехнологиях сельскохозяйственного производства Республики Беларусь успешно реализуются новые современные высокопроизводительные методы и приемы, применение которых дает возможность оптимизировать сроки проведения посевных работ и добиться более высокой урожайности. Реализация этих подходов зачастую связана с необходимостью использования конструктивных решений, например, более высоких рабочих скоростей при выполнении технологического процесса почвообрабатывающих и посевных машин, использование современных высевающих аппаратов, применение рабочих органов, наиболее точно адаптированных под имеющиеся почвенные условия и т. д., реализация которых выводит сельскохозяйственные машины на другой, более высокий технологический уровень. Кроме того, сокращение сроков проведения посевных компаний обуславливает необходимость совмещения различных операций по почвообработке и посеву. С применением на полях новых энергонасыщенных тракторов данный подход стал реальностью, а сельхозпроизводители получили возможность использовать комбинированные посевные машины, в конструкции которых заложена способность работы как по традиционной, так и по прогрессивной минимальной технологии. Такие машины имеют возможность за один проход машины выполнить несколько различных операций и достичь максимального эффекта при минимальных потерях времени. При этом производительность при функционировании ведущих узлов и деталей вышеупомянутых машин зависит от мониторинга их работы в режиме реального времени. В большинстве случаев данный контроль достигается через систему различных датчиков, объединенных через программный контроллер в общую или локальную систему.

Основная задача любой системы контроля высева – это контроль технологических параметров работы сельскохозяйственного изделия, оперативное получение сведений о неисправностях для максимально быстрого устранения проблем. Главная решаемая задача – снижение затрат в посевной сезон и получение максимальной прибыли. Эта задача реализуется через возможность ско-

рейшего устранения возникающих неисправностей и предотвращение рабочих проходов по полю с неисправными узлами, не дающими возможность качественного выполнения технологического процесса предпосевной обработки почвы и непосредственно сева.

В целом, автоматизированная система контроля качества высева (далее АСКВ) – это устройство, которое интегрируется в комбинированный почвообрабатывающе-посевной агрегат с целью мониторинга в режиме реального времени качества функционирования наиболее ответственных узлов и агрегатов изделия, а также управления отдельными операциями, такими как регулирование числа оборотов вентилятора и поддержание их в заданном диапазоне, формирование технологической колеи для последующей обработки и т. д. Управление отдельными операциями при выполнении технологического процесса обуславливает качество выполняемых работ и является очень важной составляющей системы АСКВ, например поддержание числа оборотов вентилятора в требуемом диапазоне обеспечивает качество раскладки семенного материала по глубине, что напрямую влияет на будущую урожайность, возможность регулирования этого диапазона помогает соблюдению агротехнических норм при высеве различных по объемному весу культур, которые должны заделываться на определенную техническим регламентом глубину. Технологическая колея для последующей обработки не менее важная функция, которая реализуется через прекращение подачи семян в определенные сошники, выбираемые исходя из ширины колеи транспортного средства, с помощью которого будет проводиться последующая обработка. Данная функция позволяет произвести прямую экономию семенного материала при севе. Конструктивно данная задача функционирует через электромагнитные клапаны, управляемые с помощью задаваемого программируемого в контроллере алгоритма с пульта управления. Данная функция может быть доступна как в автоматическом (программируемом), так и в ручном режиме, в зависимости от уровня подготовки и квалификации оператора.

Пульт контроля управления АСКВ размещается в удобном для оператора месте в кабине транспортного средства (тракторе). Имеет удобный интерфейс с элементами визуализации происходящих технологических процессов (рисунок 1).

Система АСКВ-агрегата почвообрабатывающе-посевного АППМ-6 необходима для контроля процесса работы функциональных узлов данной машины, формирования технологической колеи для последующих обработок с требуемым заданным ритмом, а также позволяет записывать в архив событий запрещенные режимы работы с указанием даты и времени. Общая структурная схема АСКВ на агрегат АППМ-6 с максимальной комплектацией приведена на рисунке 2. Комплектация датчиками зависит от типа: сколько высевающих аппаратов, бункеров, нужна ли технологическая колея и т. д.

Принцип работы системы АСКВ следующий: сигналы с датчиков приходят на коммутационную коробку и далее через жгут поступают на пульт управления. В пульте управления сигналы с датчиков контролируются по алгоритму согласно выбранной конфигурации. В меню пульта «**выбор типа**» по типу сеялки загружается конфигурация системы. В подменю «**датчики**» можно каждый датчик включить или выключить при необходимости. Электромагнитный клапан предназначен для формирования на поле технологической колеи (при

подаче напряжения на клапан перекрывается семяпровод и семена не поступают к сошникам). Включается и выключается клапан автоматически в зависимости от заданного периода и числа импульсов с датчика маркера или в ручном режиме подменю «датчики» подменю «состояние клапанов вкл/выкл». При включенном клапане на пульте загорается индикатор «клапан включен».

При первом включении пульта необходимо выбрать в меню тип сеялки и загрузить конфигурацию. Далее просмотреть меню согласно выбранной конфигурации (подменю «датчики»), настроить технологическую колею, проверить время. Технологическая колея настраивается следующим образом: ширину захвата орудия ухода за семенами надо разделить на ширину захвата сеялки, затем полученное число при помощи кнопок **лево-право** внести в подменю «настройки». При подаче питания пульт входит в режим «стоянка». Для перевода его в режим «работа» необходимо нажать на пульте кнопку «право», а для перевода его в режим «стоянка» необходимо нажать на пульте кнопку «лево». Для объезда препятствий необходимо нажать кнопку «объезд препятствий» (при этом блокируются некоторые датчики и технологическая колея не сбивается), обратный переход осуществляется при помощи этой кнопки. Сброс текущей площади происходит при удержании кнопки «объезд препятствий» при подаче питания (переключатель сеть перевести в положение «ВКЛ»). Общая площадь при этом не сбрасывается.

Расширенный доступ к меню пульта осуществляется при помощи технологического разъёма. При этом можно настроить часы, просмотреть архив событий, выбрать другой тип агрегата, просмотреть более точные настройки.

Перемещение по меню и подменю осуществляется кнопками «верх», «низ», «лево», «право», «ввод информации».



**Рисунок 1 – Общий вид пульта управления агрегата комбинированного почвообрабатывающе-посевного АППМ-6**

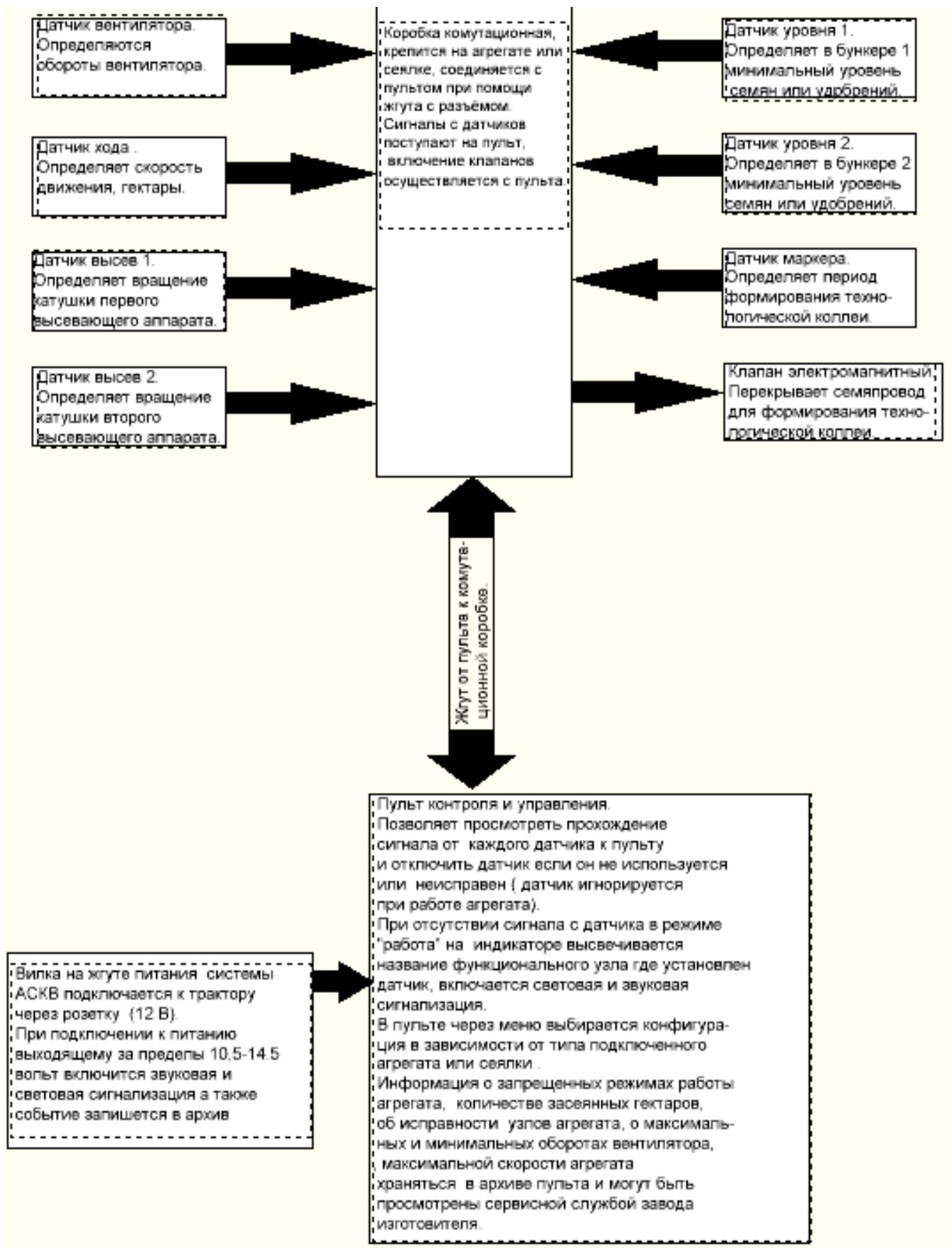


Рисунок 2 – Общая структурная схема АСКВ на агрегаты и сеялки

Представленная автоматизированная система контроля высева агрегата комбинированного почвообрабатывающе-посевного АППМ-6 в настоящее время штатно устанавливается на всех выпускаемых изделиях, позволяет значительно сократить время настройки оборотов вентилятора, технологической колеи, а также ведет непосредственно из кабины трактора наблюдение за исправностью работы основных частей машины, что предотвращает движение по полю агрегата с возникшими неисправностями, нарушающими заданный агротехнический процесс.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Руководство по эксплуатации агрегата почвообрабатывающе-посевного многофункционального АППМ-6: утв. ОАО «Брестский электромеханический завод» 16.06. 2008 г.: текст по состоянию на 01 сентября 2023 г. / А. В. Кузнецова, А. А. Кухарчук, И. В. Синюкович – Брест, 2008. – С. 27–28.

# **ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ**

## **ВЛИЯНИЕ НАНОЧАСТИЦ, СИНТЕЗИРОВАННЫХ МЕТОДОМ КОНДЕНСАЦИИ ИЗ ПЛАЗМЫ ЭЛЕКТРОВЗРЫВНОГО РАЗРЯДА В ВОДЕ, НА КРОЮЩУЮ И РАССЕИВАЮЩУЮ СПОСОБНОСТЬ ЭЛЕКТРОЛИТА ХРОМИРОВАНИЯ**

**С. Д. Лещик, П. И. Шупан, М. С. Лещик**

Учреждение образования «Гродненский государственный университет имени Янки Купалы», г. Гродно, Республика Беларусь

### **Введение**

Для повышения износостойкости деталей машин на их поверхности наносят функциональные покрытия. Хорошо зарекомендовали себя гальванические покрытия на основе хрома, которые обладают высокой износостойкостью и широко применяются в машиностроении. Номенклатура деталей, на которые можно наносить износостойкий хром, зачастую ограничивается из-за того, что на поверхностях сложного профиля покрытие осаждается неравномерно, а, например, в углублениях – не осаждается вовсе. Одним из способов совершенствования технологии хромирования, направленным на устранение или минимизацию указанных недостатков, является модификация электролитов хромирования. В качестве модификаторов можно применять высокодисперсные частицы. Это позволяет улучшить эксплуатационные характеристики электролитов и осаждаемых покрытий [1-4]. Одной из важнейших характеристик электролитов является кроющая способность – свойство электролита формировать покрытие в углублениях. На практике это означает наличие функционального покрытия на всех участках изделия и, как следствие, обеспечение заданной продолжительности его службы.

Целью настоящей работы явилось изучение влияния наночастиц, синтезированных методом конденсации из плазмы электровзрывного разряда в воде, на кроющую и рассеивающую способность электролита хромирования.

**Материалы, методика и техника экспериментальных исследований.** Получение наночастиц и наносuspензий на основе технологии конденсации из плазмы электроимпульсного разряда в жидкости, реализующей принцип разрушения электропроводящего образца одиночным электроразрядным взрывом, проводили на установке, описанной в [5]. В качестве материала образца использовали графит с примесью алюмосиликатов. Образец, представляющий собой стержень диаметром 0,7 мм и длиной 60 мм, закрепляется между электродами и погружается в разрядную камеру, емкость которой заполнена дистиллированной водой. В проведенных экспериментах использовали следующие выходные параметры синтеза: напряжение на емкостном накопителе – 8 кВ, энергия, запасенная в емкостном накопителе – не менее 600 Дж, длительность разрядного импульса – 20 мкс.

Морфологию и размеры частиц исследовали методом атомно-силовой микроскопии.

Для определения влияния наночастиц на процесс электролиза, в частности, на кроющую способность электролита, применяли процесс хромирования. Для

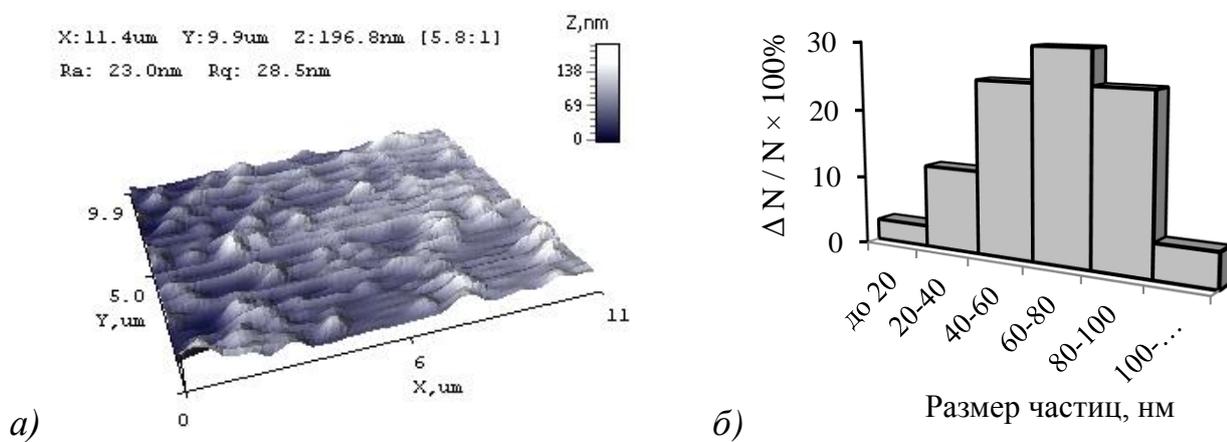
приготовления нанoeлектролита использовали воду, в которой проводили электроразрядное разрушение графитового образца, и содержащую, таким образом, наноразмерные и субмикронные частицы. Использовали рецептуру стандартного сульфатного электролита хромирования на основе шестивалентных соединений хрома следующего состава: ангидрид хромовый –  $230 \text{ г/дм}^3$ – $270 \text{ г/дм}^3$ , кислота серная –  $2,3 \text{ г/дм}^3$ – $2,7 \text{ г/дм}^3$ .

Кроющую и рассеивающую способность электролита определяли с помощью стандартной электрохимической угловой ячейки емкостью  $0,267 \text{ дм}^3$  (объем используемого электролита составлял  $0,25 \text{ дм}^3$ ) и углом катода по отношению к аноду  $51^\circ$ , называемой ячейкой Хуллы.

Критерием оценки кроющей способности электролита являлась длина участка катодной пластины, покрытая металлом. Осаждение хромового покрытия вели на полированную стальную пластину ( $100 \times 50 \text{ мм}$ ) при силе тока  $5 \text{ А}$ , температуре  $50^\circ \text{С}$  в течение не менее  $5 \text{ мин}$ .

О рассеивающей способности электролита судили по относительному приросту электроосаждаемого металла на ближнем и дальнем, относительно анода, участках разрезной катодной пластины.

**Результаты и их обсуждение.** На рисунке 1 представлены данные, полученные методом атомно-силовой микроскопии: изображение синтезированных частиц (рисунок 1а) и гистограмма их размерного распределения (рисунок 1б). Установлено, что большая часть частиц имеет размер порядка десятков нанометров.



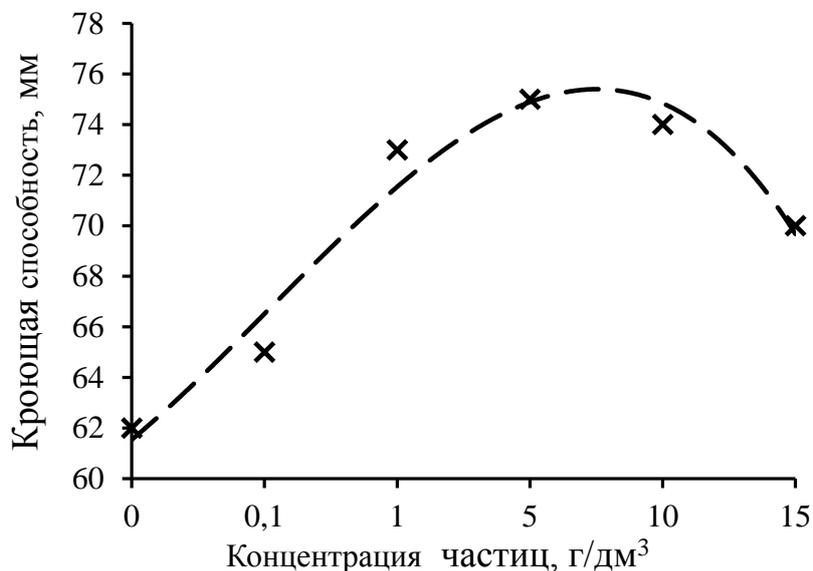
$\Delta N$  – число частиц, попавших в заданный диапазон размеров;  
 $N$  – суммарное число частиц всех размеров

**Рисунок 1 – Изображение (а) и размерное распределение частиц (б)**

На рисунке 2 приведены результаты исследований влияния наночастиц на кроющую способность электролита хромирования. В экспериментах оценивали длину хромированного участка катодной пластины после металлизации в ячейке Хуллы: чем больше длина покрытого хромом участка, тем лучше кроющая способность электролита.

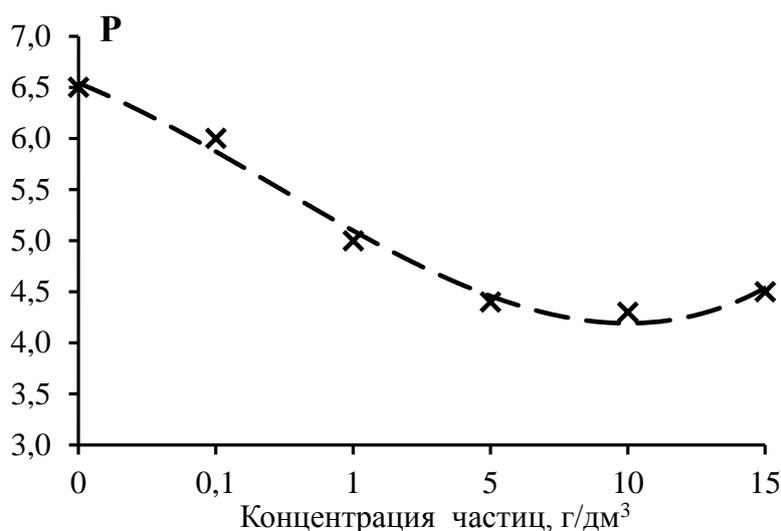
В результате экспериментальных исследований установлена зависимость кроющей способности электролита хромирования от концентрации наночастиц в его составе. Выявлено, что кроющая способность электролита хромирования

при увеличении концентрации частиц улучшается и достигает максимума при 5 г/дм<sup>3</sup>. При этом, как видно из рисунка 2, максимум на кривой достаточно пологий. Кроющая способность с ростом концентрации частиц до 1 г/дм<sup>3</sup> возрастает, в диапазоне от 1 г/дм<sup>3</sup> до 10 г/дм<sup>3</sup> изменяется незначительно, а затем ухудшается.



**Рисунок 2 – Зависимость кроющей способности электролита хромирования от концентрации наночастиц в его составе**

Результаты изучения влияния концентрации наночастиц, полученных на основе технологии конденсации из плазмы электроимпульсного разряда в жидкости, на рассеивающую способность электролита хромирования представлены на рисунке 3.



**Рисунок 3 – Зависимость рассеивающей способности Р электролита хромирования от концентрации наночастиц в его составе**

Установлено, что рассеивающая способность электролита хромирования улучшается при введении в его состав высокодисперсных частиц, синтезированных электровзрывным диспергированием углеродного материала в воде. Оценочным критерием влияния наномодификаторов на рассеивающую способность электролита служит изменение параметра  $R$ , представляющего собой отношение массы покрытия на ближнем участке разрезного катода к массе покрытия на дальнем участке (относительно анода). Изменение отношения  $R$  в меньшую сторону свидетельствует о повышении рассеивающей способности электролита. Выявлено, что величина  $R$  при концентрации частиц от 5 г/дм<sup>3</sup> до 10 г/дм<sup>3</sup> лежит в области минимальных значений. Увеличение концентрации частиц до 15 г/дм<sup>3</sup> сопровождается незначительным ростом параметра  $R$ .

**Заключение.** Приведенные результаты исследований иллюстрируют эффективность применения наномодификаторов в составе электролита хромирования для улучшения его кроющей и рассеивающей способности. Показано, что кроющая и рассеивающая способность электролита хромирования зависит от концентрации частиц в его составе.

Работа выполнена в рамках задания 2.04.3 Государственной программы научных исследований «Материаловедение, новые материалы и технологии» Республики Беларусь.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Лубнин, Е. Н. Электроосаждение хрома из сульфатно-оксалатных растворов, содержащих наночастицы оксида алюминия и карбида кремния / Е. Н. Лубнин, Н. А. Поляков, Ю. М. Полукаров // Защита металлов. – 2007. – Т. 43, № 2. – С. 199–206.
2. Литовка, Ю. В. Наномодифицированные хромовые гальванические покрытия. / Ю. В. Литовка [и др.] // Гальванотехника и обработка поверхности. – 2011. – № 19 (4). – С. 29–33.
3. Лещик, С. Д. Кинетика кристаллизации композиционного покрытия для режущего и бурильного инструмента на основе электролитического хрома и ультрадисперсных наполнителей / С. Д. Лещик // Горная механика. – 2006. – № 3, – С. 16–20.
4. Лещик, С. Д. Электроосаждение хрома из наноэлектролитов, полученных с использованием технологий лазерной абляции твердофазных материалов в водной среде / С. Д. Лещик, П. И. Шупан, А. Г. Лежава // Весн. ГрДУ імя Я. Купалы. Сер. 6, Тэхніка. – 2015. – № 1 (198). – С. 13–19.
5. Лещик, С. Д. Процессы и установки для получения наночастиц методами, использующими плазменное состояние вещества. Электроимпульсное разрушение материалов / С. Д. Лещик, В. В. Тарковский, К. Ф. Зноско // Актуальные проблемы науки и техники: материалы I Международной научно-технической конференции, Сарапул, 20–22 мая 2021 г.: СПИ (филиал) ФГБОУ ВО «ИжГТУ имени М. Т. Калашникова». – Ижевск : Изд-во УИР ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, 2021. – С. 37–41.

## **ОБОСНОВАНИЕ ДОПУСТИМЫХ ПОГРЕШНОСТЕЙ СБОРОЧНОЙ ОСНАСТКИ И НЕПОДВИЖНЫХ КОМПЕНСАТОРОВ РАЗНОЙ ТОЛЩИНЫ ДЛЯ ДОСТИЖЕНИЯ ТОЧНОСТИ СБОРКИ МАШИН МЕТОДОМ РЕГУЛИРОВАНИЯ**

**О. А. Медведев, Б. С. Дарчич**

Брестский государственный технический университет, г. Брест,  
Республика Беларусь

Анализ способов расчета сборочных размерных цепей, при достижении точности сборки методом регулирования [1, 2, и др.], позволил выявить их существенные недостатки: 1) условия достижения точности сборки не учитывают погрешности формирования размера компенсатора; 2) степень компенсации определяется без учета указанных погрешностей; 3) в величину компенсации включается допуск компенсатора и погрешности сборочных работ [3], несмотря на то, что компенсатор не может компенсировать свои погрешности.

Для составления объективного условия достижения точности сборки с учетом погрешностей сборочных работ проведен тщательный анализ размерных взаимосвязей между замыкающим звеном сборочной конструкторской размерной цепи и звеньями сборочной технологической размерной цепи, определяющей размер выбираемого компенсатора. Такой подход позволяет в значительной мере устранить указанные ранее недостатки.

Размер неподвижного компенсатора, требуемого для отдельного экземпляра собираемого узла, в большинстве случаев находится путем измерения места под компенсатор, полученного при предварительной сборке узла без компенсатора, когда на место замыкающего звена устанавливается его эталон. Если толщина выбранного компенсатора равна размеру измеренного места, то после окончательной сборки узла с таким компенсатором замыкающее звено будет равно размеру эталона. В противном случае отклонение компенсатора от размера указанного места приведет к такому же по величине отклонению замыкающего звена от эталона. Следовательно, вместо зависимости точности замыкающего звена от точности всех составляющих звеньев конструкторской размерной цепи возникает зависимость точности замыкающего звена только от точности компенсатора.

Для определения поля рассеяния компенсатора следует выявить и решить технологическую сборочную размерную цепь, которая формируется на этапе предварительной сборки узла и определения толщины требуемого компенсатора. Замыкающим звеном в ней является толщина выбранного компенсатора, а составляющими звеньями, кроме размеров деталей узла, также являются размеры используемой сборочной оснастки (эталон замыкающего звена) и погрешности выполнения сборочных работ. В этих условиях поле рассеяния величины компенсатора в пределах партии собираемых узлов, подлежащее компенсации,

следует определять как сумму полей рассеяния всех составляющих звеньев технологической размерной цепи. Целенаправленным, индивидуальным для отдельного экземпляра собираемого узла, изменением толщины компенсатора возможно компенсировать только отклонения той части составляющих звеньев, которые имеют стабильные значения для этого экземпляра, то есть отклонения звеньев, являющихся размерами деталей узла. Сумму полей рассеяния второй части составляющих звеньев технологической цепи, которые могут приобрести случайные значения в конкретном экземпляре узла, возможно компенсировать только за счет допуска замыкающего звена конструкторской размерной цепи. К таким звеньям относятся: погрешность изготовления эталона замыкающего звена  $\delta_z$ , погрешность установки эталона  $\delta_{уз}$ , погрешность измерения места под компенсатор  $\delta_u$ , погрешность изготовления компенсатора  $\delta_k$ , погрешность выбора компенсатора  $\delta_e$  (отклонение номинальной толщины выбранного компенсатора от результата измерения места под компенсатор).

Проведенный анализ влияния элементов технологической сборочной размерной цепи на погрешность размера выбранного компенсатора, а, следовательно, и на погрешность замыкающего звена сборочной конструкторской цепи, позволяет составить условие достижения точности сборки при методе регулирования неподвижными компенсаторами разной толщины и определить величину компенсации изменением толщины компенсатора.

Величину компенсации  $V$ , обеспечиваемую за счет целенаправленного изменения компенсатора, следует определять как сумму полей рассеяния  $\delta_j$  звеньев, являющихся размерами деталей узла, участвующих в предварительной сборке ( $m$  звеньев кроме компенсатора).

$$V = \sum_{j=1}^m \delta_j . \quad (1)$$

С учетом проведенного анализа технологической цепи условие достижения точности сборки должно отражать соотношение допуска замыкающего звена  $TA_{\Delta}$  конструкторской цепи и суммы погрешностей, вызывающих отклонение размера места под компенсатор от толщины выбранного компенсатора (в пределах использования одного компенсатора из комплекта)

$$TA_{\Delta} \geq \delta_z + \delta_{уз} + \delta_u + \delta_k + \delta_e . \quad (2)$$

Таким образом, при высокой точности сборочной оснастки измерительных средств и компенсаторов можно обеспечить высокую точность сборки при невысокой точности составляющих звеньев конструкторской размерной цепи (кроме компенсатора).

Важным параметром полученного условия достижения точности является погрешность выбора компенсатора нужной толщины из заранее изготовленного комплекта компенсаторов, в котором толщины соседних компенсаторов отличаются на величину ступени компенсации. Анализ условий выбора компенсатора позволяет сделать вывод, что при соблюдении технологического регламента эта погрешность не может превышать ступень компенсации. Поэтому ступень компенсации  $S$ , как максимальную величину погрешности выбора

толщины компенсатора, при которой условие достижения точности сборки (2) превращается в равенство, следует определять по формуле

$$S = TA_{\Delta} - \delta_{\vartheta} - \delta_{\gamma\vartheta} - \delta_u - \delta_{\kappa}. \quad (3)$$

Число ступеней компенсации  $N$  (число компенсаторов в комплекте) определяется делением величины компенсации на ступень компенсации

$$N = \frac{V}{TA_{\Delta} - \delta_{\vartheta} - \delta_{\gamma\vartheta} - \delta_u - \delta_{\kappa}}. \quad (4)$$

Полученное условие достижения точности замыкающего звена  $A_{\Delta}$  и выражение для расчета числа ступеней компенсации можно использовать для определения рациональных значений погрешностей сборочной оснастки (материального эталона замыкающего звена и измерительного средства), погрешностей установки эталона и изготовления компенсатора. Как следует из выражения (4) уменьшение указанных погрешностей до минимально возможных значений при прочих равных условиях приведет к уменьшению числа компенсаторов в комплекте и, возможно, к снижению затрат на изготовление комплекта компенсаторов. Однако малые значения погрешностей возможны при использовании более дорогой сборочной оснастки и дорогостоящей технологии изготовления точных компенсаторов, что может привести к повышению общих затрат на достижение требуемой точности.

Погрешность размера эталона замыкающего звена  $A_{\Delta}$  может быть принята равной допуску этого размера. Так как количество требуемых эталонов замыкающего звена  $A_{\Delta}$  для изделия определенной конструкции невелико, то его без существенных затрат можно изготовить с максимально возможной на данном предприятии точностью (обычно с точностью размера по 6...7 квалитетам).

Погрешность установки эталона  $\delta_{\gamma\vartheta}$  следует рассчитывать на основе геометрических схем его возможных перекосов в собираемом изделии. При исключении возможности перекосов эталона погрешность его установки может быть принята равной большому из двух параметров: либо погрешности формы установочной поверхности эталона; либо параметру  $R_z$  шероховатости установочной поверхности эталона.

При выборе средства измерения размера места под компенсатор целесообразно учитывать взаимосвязь между значениями  $\underline{\delta}_u$  и  $s$ , которая аналогична взаимосвязи допустимой погрешности измерения и допуска контролируемого параметра. Обычно ступень компенсации имеет значение от нескольких сотых до нескольких десятых долей миллиметра, что при размере места под компенсатор 3...5 мм соответствует точности грубее 9 квалитета. В соответствии с рекомендациями [4] и ГОСТ 8.051-81 для достоверного измерения и заключения о годности, погрешность измерения не должна превышать одной пятой части от допуска контролируемого параметра. Следовательно, исключить ошибочный выбор компенсатора, отличающегося от размера места под компенсатор более чем на одну ступень компенсации  $S$ , можно, если погрешность измерения будет соответствовать условию

$$\delta_u \leq 0,2 \cdot S. \quad (5)$$

После преобразований формулы (4) с учетом взаимосвязи (5) получим

$$N = \frac{V}{0,83(TA_{\Delta} - \delta_{\gamma} - \delta_{\gamma\beta} - \delta_{\kappa})}. \quad (6)$$

Наиболее существенное влияние на затраты при достижении точности имеет значение погрешности изготовления компенсаторов. Эти затраты можно выразить произведением затрат на один компенсатор на число компенсаторов в комплекте.

Учитывая противоположное влияние  $\delta_{\kappa}$  на первый и второй множитель, можно предположить, что характер зависимости затрат на изготовление компенсаторов от их точности близок к параболическому, с минимальным значением в пределах реального изменения точности от 6 до 14 квалитета.

Для определения значения  $\delta_{\kappa}$ , приводящего к минимуму затрат на изготовление комплекта компенсаторов, была разработана типовая технология мехобработки плоских границ компенсаторов в виде колец диаметром до 150 мм с разным уровнем точности, состоящая из черного, получистового, чистового фрезерование и предварительного, чистового, тонкого плоского шлифования. Для каждой стадии обработки составлены математические модели расчета основного времени. Затраты на отдельную стадию обработки определялись, как произведение затрат на одну минуту работы оборудования, принятого для ее выполнения [5], на основное время этой стадии обработки в минутах. Полученная таким образом математическая модель затрат на обработку плоских границ компенсаторов разной точности и компьютерная программа для определения точности изготовления компенсаторов, приводящей к минимуму затрат на мехобработку комплекта компенсаторов, позволяет повысить объективность определения величины и ступени компенсации, параметров точности сборочной оснастки. Она может быть полезна инженерам-технологам, занимающимся проектированием техпроцессов сборки машин.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Маталин, А. А. Технология машиностроения: учебник / А. А. Маталин – 5-е изд., стер. – Санкт-Петербург : Лань, 2020. – 512 с.
2. Солонин, И. С. Расчет сборочных и технологических размерных цепей / И. С. Солонин, С. И. Солонин. – М. : Машиностроение, 1980 – 110 с.
3. Технология машиностроения (специальная часть): учебник для машиностроительных специальностей вузов / А. А. Гусев [и др.] – М. : Машиностроение, 1986. – 480 с.
4. Справочник технолога-машиностроителя / под ред. А. М. Дальского [и др.] – 5-е изд. перераб. и доп. В 2-х томах – М. : Машиностроение, 2001.
5. Расчеты экономической эффективности новой техники: справочник / под общ. ред. К. М. Великанова. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л. : Машиностроение, 1990. – 448 с.

## **МЕТОДИКА ЦЕХОВЫХ ИСПЫТАНИЙ ШУМОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ОБОРУДОВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОБИЛЬНЫХ ПРИЛОЖЕНИЙ**

**Д. С. Сергуцкий, В. Ф. Григорьев**

Брестский государственный технический университет, г. Брест,  
Республика Беларусь

### **Введение**

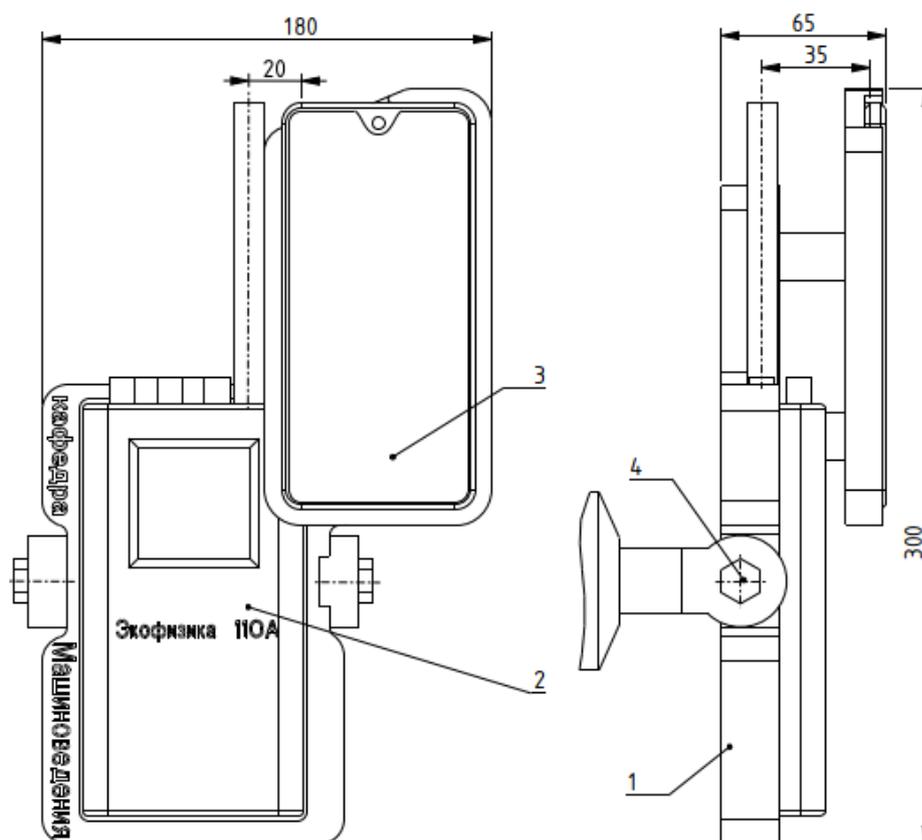
Изучение и разработка систем контроля технического состояния металло-режущих станков по параметрам шумовых характеристик является важной и актуальной задачей. Такие системы позволяют своевременно определить отклонения в работе оборудования и предотвратить отказы и простои по причине незапланированного ремонта. Особенно целесообразно их использование для контроля состояния современных станков с ЧПУ для высокоскоростной обработки. В качестве аппаратуры для измерения уровней звука и октавных уровней звукового давления используют шумомеры не ниже 2-го класса в соответствии с ГОСТ 17187-2010 «Шумомеры. Общие технические требования и методы испытаний» [1]. Перспективным является использование мобильных приложений для измерения шумовых характеристик оборудования [2].

Целью работы было исследование возможности использования мобильных приложений для определения шумовых характеристик технологического оборудования в цеховых условиях.

Для проведения исследования был выбран метод, основанный на сопоставлении фактических шумовых характеристик станка с допустимыми шумовыми характеристиками в соответствии с ГОСТ 12.2.107-85 «Шум. Станки металлорежущие. Допустимые шумовые характеристики». В ГОСТе указаны допустимые значения шумовых характеристик для станков суммарной эквивалентной мощностью электродвигателей от 2 до 64 кВт. В качестве эталонного прибора для измерения уровней звукового давления и уровней звука был использован шумомер-виброметр анализатор спектра ЭКОФИЗИКА-110А, измерительные тракты которого соответствуют требованиям ГОСТ 17168-82 «Фильтры электронные октавные и третьоктавные». Также для измерения использовалось мобильное приложение «Анализатор спектра звука» («SPL-анализатор»), установленное на мобильное устройство связи Xiaomi redmi note 8t. Как было показано [3], характеристики приложения в диапазоне частот 30–14000 Гц соответствуют характеристикам шумомера-виброметра анализатора спектра.

Измерения шумовых характеристик станков проводились в учебно-производственных мастерских Брестского государственного технического университета на токарных станках: Кусон-3 (Северная Корея) с номинальной мощностью электродвигателя  $P=7,5$  кВт и Optimum D460 (Германия),  $P = 5,5$  кВт. Измерения осуществлялись в режиме «перерыв», когда работал один из двух испытуемых станков и в режиме «работа» – работали оба станка на холостом ходу с максимальной частотой вращения шпинделя. Станки располагались на расстоянии пяти метров.

Шумомер Экофизика 110А и мобильное устройство связи устанавливались в специальное удерживающее приспособление (Рисунок 1). Приспособление состоит из рамки-корпуса 1 с двумя лотками, предусматривающими расположение шумомера 2 и устройства связи 3 таким образом, чтобы их микрофоны были на минимальном расстоянии друг от друга: 35 мм по вертикали и 20 мм в горизонтальной проекции.



1 – рамка-корпус; 2 – шумомер; 3 – устройства связи; 4 – узел крепления

Рисунок 1 – Схема установки устройств в удерживающем приспособлении

Приспособление, закрепленное на штативе, устанавливалось на высоте 1,5 м и на расстоянии 1 м от переднего конца шпинделя в соответствии с ГОСТ 12.1.028-80 (Рисунок 2).

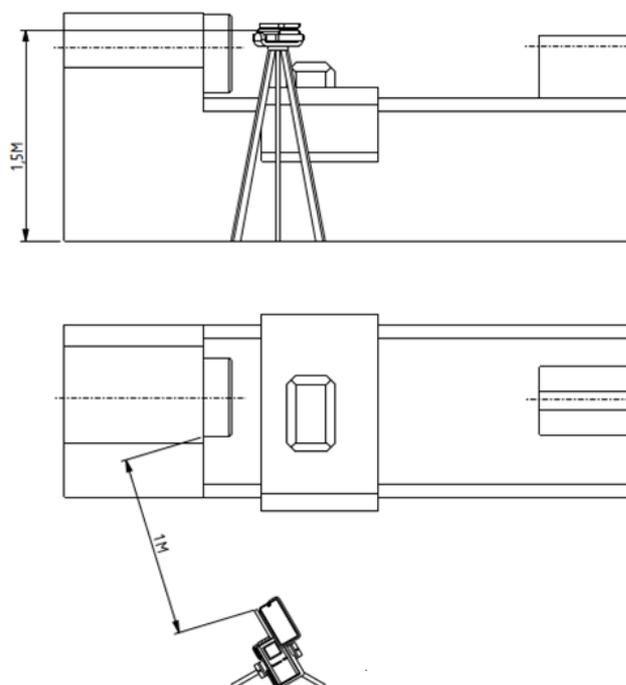


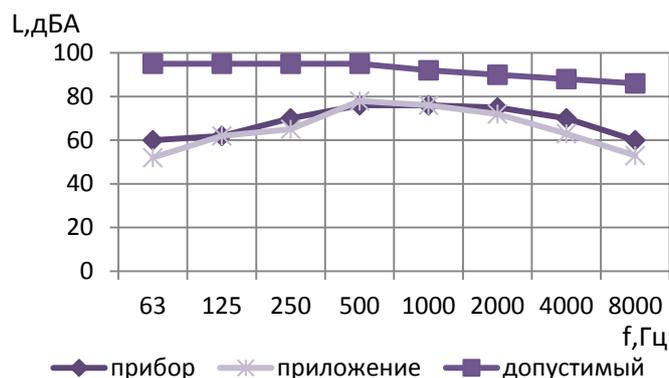
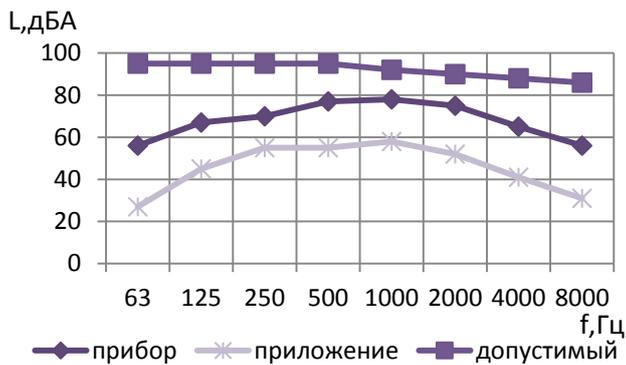
Рисунок 2 – Схема измерения параметров шума

Испытания проводились в три этапа. На первом этапе проводились измерения уровня шума станка КУСОН-3 на холостом ходу **при максимальной частоте вращения шпинделя  $n = 1600 \text{ мин}^{-1}$  в режиме «перерыв» на протяжении одной минуты (Таблица 1).**

Таблица 1 – Октавные уровни звуковой мощности при работе станка КУСОН- 3 ( $n = 1600 \text{ мин}^{-1}$ ) **в режиме «перерыв» до и после калибровки, дБА**

среднеоктавная частота, Гц	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
ЭКОФИЗИКА-110А	56	67	70	77	78	75	65	56
до калибровки								
Xiaomi redmi note 8t	27	45	55	55	58	52	41	31
отклонение, дБА	-29	-22	-15	-22	-20	-23	-24	-25
относительное отклонение, %	-51,8	-32,8	-21,4	-28,6	-25,6	-30,7	-36,9	-44,6
после калибровки								
Xiaomi redmi note 8t	52	62	65	78	76	72	63	53
отклонение, дБА	-8	0	-5	-2	0	-3	-7	-7
относительное отклонение, %	-13,3	0,0	-7,1	-2,6	0,0	-4,0	-10,0	-11,7

Ввиду существенных отклонений измеренного уровня шума на среднеоктавных частотах 63Гц (29дБА и 51 %) и 8000 Гц (25дБА и 44,6 %) выполнялась калибровка мобильного приложения по эталонным показаниям шумомера. На графиках спектров шума до и после калибровки они показаны вместе с допустимой границей по ГОСТ 12.2.107-85 (Рисунок 3).



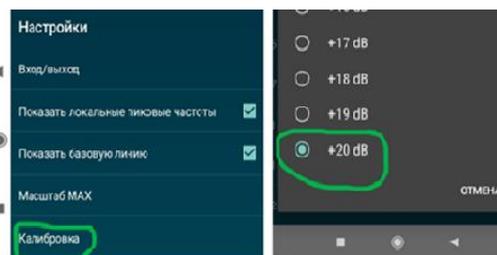
а)

б)

а) – до калибровки; б) – после калибровки

Рисунок 3 – Спектры шума станка Кусон-3 ( $n = 1600 \text{ мин}^{-1}$ ) в режиме «перерыв»

Мобильное приложение позволяет выполнить калибровку в пределах от -20дБ до +20дБ для каждой октавы. Для этого необходимо зайти в меню «настройки», далее выбрать вкладку «калибровка» и установить для каждой частоты свое значение поправки.



а)

б)

в)

а) – главное окно приложения; б) – меню настройки; в) – меню значений калибровки  
Рисунок 4 – Калибровка значений уровней звуковой мощности в мобильном приложении «Анализатор спектра звука»

На втором этапе измерялся уровень шума станка Optimum D460 с откалиброванным приложением. Результаты измерений приведены в таблице 2 и рисунке 5.

Таблица 2 – Октавные уровни звуковой мощности при работе станка Optimum D460 ( $n = 2000 \text{ мин}^{-1}$ ) в режиме «перерыв», дБА

среднеоктавная частота, Гц	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
ЭКОФИЗИКА-110А	53	57	66	78	78,5	77	72,5	66
Xiaomi redmi note 8t	52	61	61	79	79	76	65	58
отклонение, дБА	-1	-4	-5	-1	-0,5	-1	-7,5	-8
относительное отклонение, %	-1,9	-7,0	-7,6	-1,3	-0,6	-1,3	-10,3	-12,1

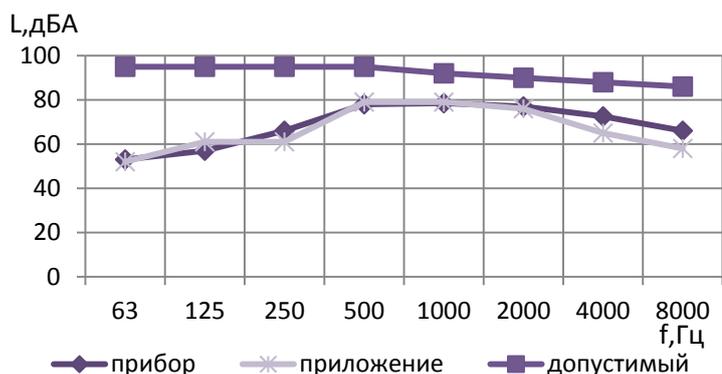
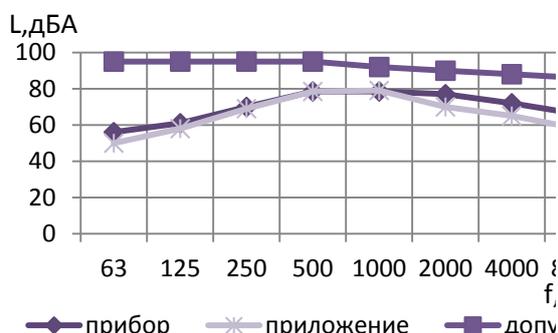
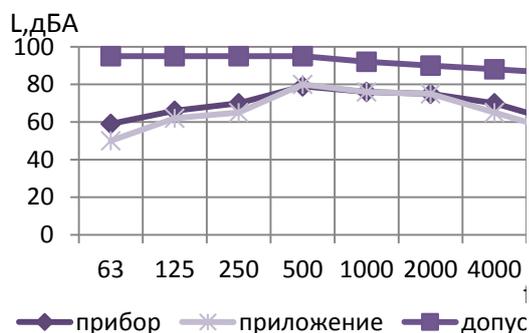


Рисунок 5- Спектр шума станка Optimum D460 ( $n=2000 \text{ мин}^{-1}$ ) в режиме «перерыв»

Затем проводились измерения уровня шума станков при их одновременном включении на холостом ходу (режим «работа»). Результаты замеров представлены в таблице 3 и рисунке 6.

Таблица 3 – Октавные уровни звуковой мощности при работе станков в режиме «работа», дБА

среднеоктавная частота, Гц	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
значения для станка КУСОН-3								
ЭКОФИЗИКА-110А	59	66	70	79	76	75	70	60
Xiaomi redmi note 8t	50	62	65	80	76	75	65	55
отклонение, дБА	-9	-4	-5	-1	0	0	-5	-5
относительное отклонение, %	-15,3	-6,1	-7,1	-1,3	0,0	0,0	-7,1	-8,3
значения для станка Optimum D460								
ЭКОФИЗИКА-110А	56	61	70	78,5	78,5	77	72	66
Xiaomi redmi note 8t	50	58	69	78,5	79	70	65	58
отклонение, дБА	-6	-3	-1	0	-0,5	-7	-7	-8
относительное отклонение, %	-10,7	-4,9	-1,4	0,0	-0,6	-9,1	-9,7	-12,1



а)

б)

а) – для станка КУСОН-3; б) – для станка Optimum D460

Рисунок 6- Спектры шума станков при работе в режиме «работа»

**Результаты исследования и обсуждение.** Измерения показали, что уровни шума станков находятся в пределах допустимых значений. При этом скоростной станок Optimum D460 ( $n_{\max} = 2000 \text{ мин}^{-1}$ ) ожидается показывает более высокий уровень шума в октавных полосах свыше 2000 Гц.

Калибровкой приложения не удалось устранить различие показаний с эталонным шумомером в октавных полосах 63–250 Гц и 4000–8000 Гц. Это обусловлено различными чувствительностью и диаграммой направленности микрофонов устройств. Для устранения разницы показаний возможно применение индивидуальной таблицы поправок по октавным полосам приложения.

Перспективно применение методики для мониторинга состояния технологического оборудования на основе «звукового портрета» с помощью мобильного устройства связи.

### **Заключение**

Представленная методика позволяет с инженерной точностью определять шумовые характеристики оборудования в цеховых условиях. Применяемое мобильное приложение можно использовать для диагностики состояния оборудования.

### **СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Машиностроение: Энциклопедия / ред. совет: К. В. Фролов (пред.) [и др.]. – 2-е изд., испр. – М. : Машиностроение, 2002. – Т. 4–7: Металлорежущие станки и деревообрабатывающее оборудование / Б. И. Черпаков [и др.]; под ред. Б. И. Черпакова. – 864 с.
2. Григорьев, В. Ф. Оценка возможности применения мобильных устройств связи для проверки шумовых характеристик технологического оборудования / В. Ф. Григорьев, Ю. А. Дакало // Вестник БрГТУ. – 2019. – № 4 (117): Машиностроение. – С. 39–42.
3. Сергуцкий, Д. С. Сравнительный анализ мобильных приложений для спектрального исследования шума / Д. С. Сергуцкий, В. Ф. Григорьев // Инновационные технологии в машиностроении [Электронный ресурс]: электрон. сб. материалов Междунар. науч.-техн. конф, Новополоцк, 18–19 апреля 2023 г. – Новополоцк : ПГУ, 2023. – С. 118–120.

**ИНЖЕНЕРИЯ ПОВЕРХНОСТИ СОВРЕМЕННЫЕ  
МЕТОДЫ РАСЧЕТА ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ  
И НАПРЯЖЕНИЙ**

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ТЕЧЕНИЯ И НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПРИ РАВНОКАНАЛЬНОМ УГЛОВОМ ПРЕССОВАНИИ**

**Пряхин С.С., Ломач М.С., Рубаник В.В., Рубаник В.В. мл.**

Институт технической акустики НАН Беларуси,

г. Витебск, Республика Беларусь

Равноканальное угловое прессование (РКУП) является перспективным направлением модификации структуры материала. Оно использует воздействие интенсивной пластической деформации простого сдвига на материал при его прессовании через область пересечения каналов с одинаковой площадью сечения [1]. При этом в металлах и сплавах происходит измельчение размера зернистой структуры и улучшение при этом ряда физико-механических свойств.

Однако для реализации РКУП необходимо создавать значительные усилия по продавливанию заготовки через матрицу. Одним из путей снижения усилия прессования, является уменьшение сил трения между заготовкой и оснасткой, а также снижение деформационных усилий в зоне сопряжения каналов матрицы. В частности, за счет применения устройств с различными вариантами сопряжений между входным и выходным каналами [1, 2], и понижающих трение смазок [3], известно, что ультразвуковая обработка является одним из высокоэффективных методов не только влияния на силовые условия деформирования, но и на изменение микроструктуры и физико-механических свойств материалов [4]. Так за счет ультразвукового воздействия возможно улучшение структуры металлов при литье, снятие внутренних напряжений в деформированных металлах, повышение характеристик пластичности (акустопластический эффект) и др. При этом, в зависимости от частоты, амплитуды, локальности воздействия, можно достичь как упрочнения металла, так и его разупрочнения, пластификации. В частности, эффективно и оправданно использование ультразвуковых колебаний при обработке металлов давлением (ОМД), например, волочение и прессование порошковых материалов. В частности, предложено интенсифицировать процесс прессования порошка пьезокерамики за счет энергетического ультразвукового воздействия [5], где ультразвуковые колебания (УЗК) снижая силы трения влияют как на протекание процесса прессования, так и на свойства получаемых заготовок. Ранее были получены экспериментальные данные о существенном снижении в 1.5- 2 раза нагрузки РКУП при использовании ультразвуковых колебаний [6].

Цель исследований состояла в установлении влияния взаимно связанных факторов: силовой характеристики процесса, трения, динамики распределений полей течения и переменных напряженно-деформированного состояния в прессуемом материале. При этом использовалось сопоставление характеристик, полученных путем моделирования РКУП с учетом трения и без трения. Исследована возможность снижения нагрузки прессования до уровня, полученного в экспериментах [6], за счет влияния ультразвуковых колебаний на величину эф-

фективного коэффициента трения. Для моделирования РКУП использовалась двумерная постановка задачи расчета динамики напряженно-деформированного состояния с использованием пакета DEFORM 2D, входящего в состав программного комплекса DEFORM 10.0.

Рисунок 1а иллюстрирует схему моделируемого процесса и взаимодействия участвующих в нем объектов при РКУП. Матрица 1 имеет два канала входной 2 и выходной 3, имеющие одинаковую ширину  $d = 5$  мм. Каналы пересекаются между собой под углом  $90^\circ$ , образуя передний 4 и задний 5 углы сопряжения. Во входной канал матрицы помещается прессуемый пластический объект первоначально в виде заготовки, имеющей высоту 20 мм и ширину  $d = 5$  мм. Активным элементом является пуансон 7, который движется с постоянной скоростью  $V$ . Под нагрузкой пуансона заготовка выпрессовывается в выходной канал матрицы. Движение пуансона прекращают после того, как он достигнет кромки переднего угла.

Рисунок 1б иллюстрирует представления задачи моделирования плоских напряженно-деформированных состояний, в котором компоненты тензоров деформации и компоненты векторов скоростей, имеющие индекс  $z$ , имеют нулевые значения. Для нагрузочных характеристик в пакете DEFORM 2D толщина прессуемого материала и оснастки по умолчанию принимается равной единичному размеру  $\Delta Z = 1$  мм.

Материал элементов оснастки для прессования матрица и пуансон считается жестким. В качестве модельного материала прессуемого объекта из Библиотеки материалов программного комплекса DEFORM V10.0 выбран сплав AL 1100, имеющий жесткопластическую модельную функцию течения. Материал прессуемого объекта считали объемно несжимаемым, а описание связи между напряжением и деформацией формулировали в виде уравнений теории пластического течения Леви-Мизеса. Трение материала описывалось законом Амонтона-Кулона. РКУП рассматривали как процесс изотермический.

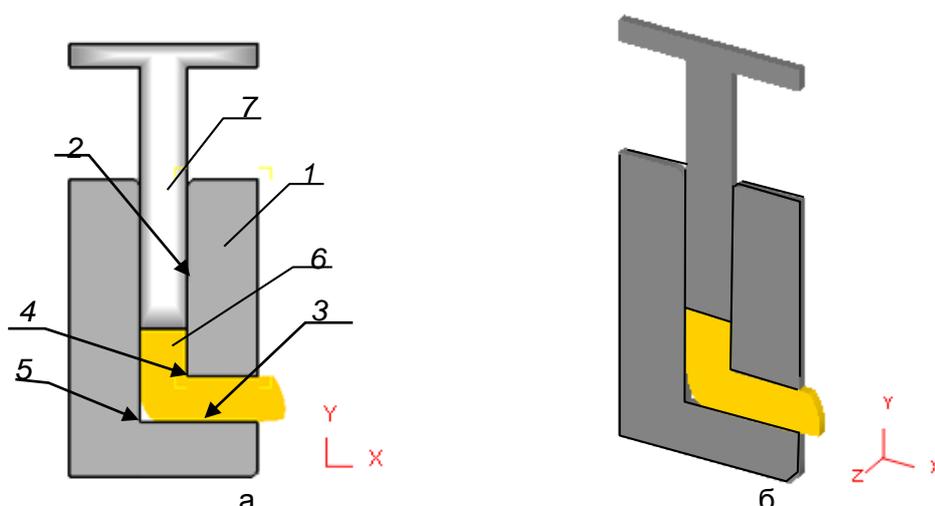
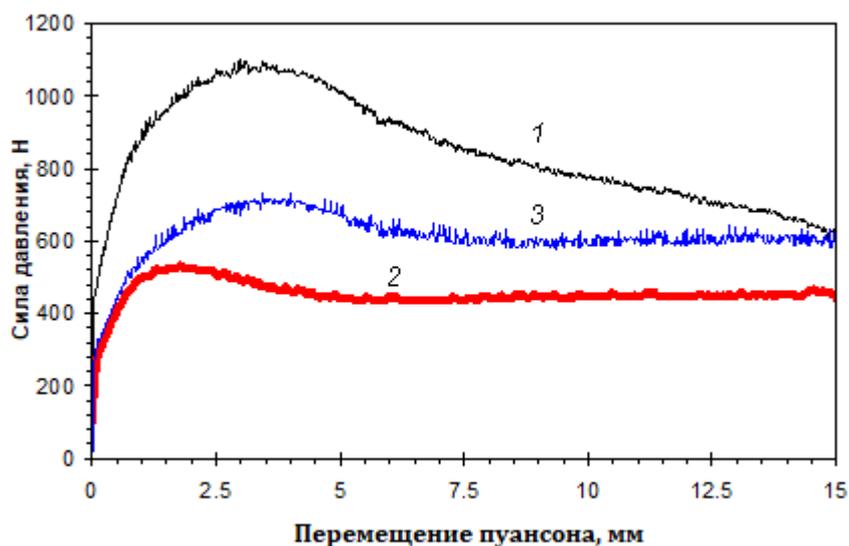


Рисунок 1 – Схема реализации РКУ прессования - а; и модельные представления в рамках плоских напряженно-деформированных состояний - б

При моделировании были получены результаты, свидетельствующие, что скорость перемещения плунжера оказывает малое влияние на нагрузку прессования, а динамика ее изменения определяется величиной его перемещения. Это связано с тем, что закон течения пластического материала в изотермическом процессе слабо зависит от скорости деформации. При этом в заданной геометрии РКУП история полей деформации определяется расстоянием перемещения плунжера. Результаты моделирования приводятся для одной скорости перемещения пуансона  $V = 4.0$  мм/с.

Моделирование показывает, что трение оказывает существенное влияние на динамику изменения нагрузки. На рисунке 2 приведены нагрузочные характеристики для процессов, осуществляемых в процессах с трением (кривая 1) и без трения (кривая 2). Их сопоставление показывает, что в процессе с нулевым коэффициентом трения пик начального максимума достигается быстрее, и он имеет меньшую ширину в сравнении с пиком процесса с участием трения. Далее следует участок с почти стационарной величиной нагрузки вплоть до значения 15 мм. Последующее движение сопровождается перекрытием пуансоном сечения выходного канала.



**Рисунок 2 – Зависимости нагрузки на пуансон от расстояния его перемещения при коэффициентах трения: 1)  $\mu = 0.12$ ; 2)  $\mu = 0$ ; 3) сила давления на прессуемый материал на входе в зону пересечения входного и выходного каналов при  $\mu = 0.12$**

Для выяснения роли трения в падении нагрузки проведен расчет динамики силы давления перед границей области пересечения каналов, в которой формируется область с наиболее высокой интенсивностью напряжения. Применялось отслеживание компоненты напряжения  $\sigma_y$  по текущим значениям в 11 точках, расположенных перед пересечением каналов вдоль неподвижной линии ориентированной в направлении оси  $X$ . Характеристика изменения силы давления при прессовании на рисунке 2 представлена зависимостью 3. Аналогично процессу без трения после пика максимума на этой кривой образуется линейный участок, сохраняющий стационарный характер при дальнейшем перемещении пуансона. Исходя из этого результата, можно утверждать, что разность между

кривой 1 и кривой 3 характеризует линейный характер уменьшения силы трения во входном канале. В этом случае перемещение пуансона сопровождается равномерным перетеканием материала через зону деформации из области высокого давления в область пониженного давления. В процессе без трения такого механизма нет. Это объясняет отличие поведения линейных участков нагрузочных кривых 1, 2 на рисунке 2 в процессах с трением и без трения.

Проводился расчет нагрузки в условии наложения ультразвуковых колебаний продольно направлению скорости перемещения пуансона  $V_0$  с учетом эффективного значения коэффициента трения  $\mu_{\text{USO}}$  (1), полученного из результатов работы В.Кумара:

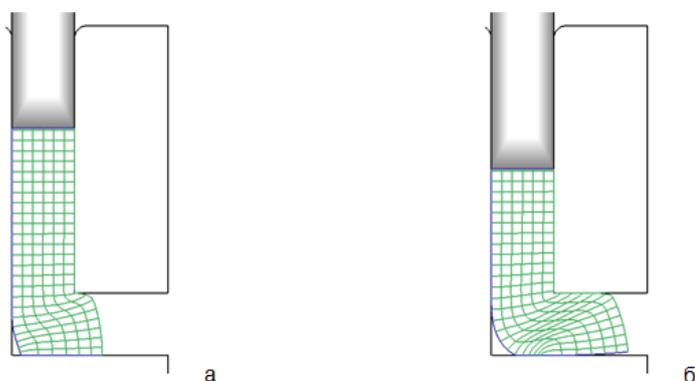
$$\mu_{\text{USO}} = \mu \frac{2}{\pi} \arcsin\left(\frac{V_0}{a\omega}\right) \quad (1)$$

При исходных данных в (1): скоростях поступательного движения  $V_0 = 0.5 \div 8.0$  мм/с; амплитуде ультразвуковых колебаний  $a = 5$  мкм; циклической частоте колебаний  $\nu = 18$  кГц, величина  $\mu_{\text{USO}}$  на 2-3 порядка меньше в сравнении с коэффициентом трения скольжения в отсутствии колебаний  $\mu = 0.12$ . В результате такого падения трения расчетная зависимость нагрузки от перемещения пуансона становится графически неразличимой с зависимостью в отсутствии трения (кривая 2). Таким образом, экспериментальные данные об эффекте снижения нагрузки в 1.5-2 раза за счет применения ультразвука в процессе РКУП в [5] могут быть обоснованы эффектом снижения силы трения скольжения при наложении колебаний продольно направлению скорости перемещения тела, описанным в работе [7].

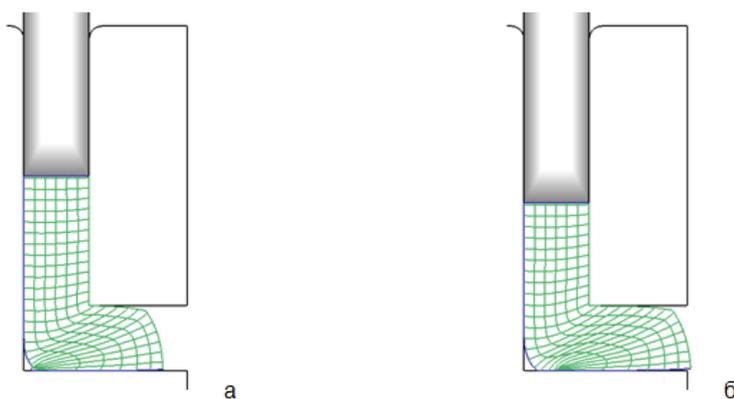
Сопоставляя диаграммы динамики лагранжевой сетки, выявим особенности течения пластического материала, проявляющиеся без трения (рисунок 3) и в условии трения (рисунок 4). После начальной стадии вытеснения материала на стадии максимальной нагрузки начинается установление течения материала относительно кромки переднего угла матрицы. При этом в процессе без трения установление такого течения сопровождается отрывом материала от кромки заднего угла. В процессе с трением такой отрыв происходит на более поздней стадии пластического течения. И лагранжева сетка приобретает более протяженный участок с сильными искажениями. Трение на дне матрицы препятствует такому отрыву материала и установлению течения, как вдоль нижней границы матрицы, так и верхней границы выходного канала. В обоих случаях пресования искажение сетки выше зоны пересечения каналов незначительны.

Отличия в динамике распределений интенсивностей напряжений показаны на рисунке 5а (процесс без трения) и рисунке 5б (с трением). На диаграмме, полученной для процесса без трения, прежде всего, обращает на себя внимание поведение области с максимальными их значениями. Она имеет веретенообразную форму. С момента отрыва материала от заднего угла ее локализация остается практически неизменной. Концы этой области соприкасаются с кромкой переднего угла и крайней левой точкой соприкосновения движущегося материала с дном матрицы. Ее размеры и форма также практически неизменны. Охватывающие данную область соседние области с уровнями напряжения чуть пре-

вышающими порог пластического течения (40 МПа) отстоят от зоны пересечения каналов во входном канале на  $\sim 3.7$  мм и на 1.3 мм в выходном. Поэтому интенсивности напряжения в материале после выходного канала несопоставимо малы в сравнении с максимальными интенсивностями.



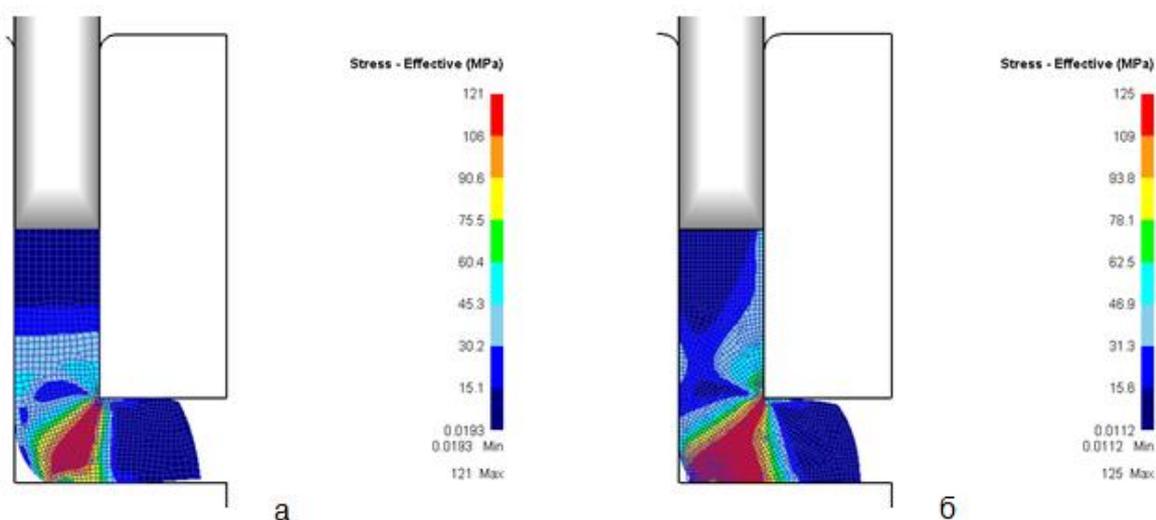
**Рисунок 3 – Изменения лагранжевой сетки пластического течения для  $\mu = 0$  при перемещениях пуансона а) 1.75 мм; б) 5.05 мм**



**Рисунок 4 – Изменения лагранжевой сетки пластического течения для  $\mu = 0.12$  при перемещениях пуансона а) 5.05 мм; б) 7.5 мм**

В процессе с трением область с максимальными интенсивностями напряжения отличается по форме. Она верхним концом также касается переднего угла матрицы, но имеет протяженную границу соприкосновения с дном матрицы, соразмерную ширине каналов. После отрыва материала от кромки заднего угла (рисунок 5б) и установления течения граница ее соприкосновения дном матрицы незначительно сокращается. Однако лишь условно можно утверждать, что она при этом приобретает веретенообразную форму к моменту пересечения пуансоном выходного канала. В выходном канале на расстоянии  $\sim 1.7$  мм от области пересечения каналов интенсивность напряжения также становится малой. Однако во входном канале, у правой его границы, с момента достижения максимальных нагрузок образуется протяженная область повышенных интенсивностей напряжения. По цветовой диаграмме уровень ее интенсивности напряжений сопоставим с порогом течения. Поэтому в диаграмме на рисунке 4а не-

большие искажения лагранжевой сетки для материала во входном канале перед очагом деформации можно обнаружить.



**Рисунок 5 – Распределения интенсивности напряжения для стадии перемещения пуансона 5.05 мм а) при  $\mu = 0$ ; б)  $\mu = 0.12$**

Анализ результатов моделирования дает основание утверждать, что качественные изменения динамики нагрузки и полей напряженно-деформированных состояний связаны фазами установления течения пластического материала через матрицу:

- в начале прессования происходит вытеснение материала из зоны пересечения каналов в выходной канал, а течения вдоль стенок выходного канала нет. В этой фазе скорость нарастания нагрузки по перемещению пуансона максимальная. Трение между материалом и стенками входного канала повышает эту скорость. В зоне пересечения каналов появляется область с повышенной интенсивностью напряжения;

- начинается течение материала вдоль верхней кромки выходного канала. В этой фазе скорость нарастания нагрузки падает до нуля, при этом величина нагрузки достигает максимума. В зоне пересечения каналов происходит нарастание интенсивности напряжений;

- начинается течение вдоль дна зоны пересечения каналов и нижней кромки выходного канала. Трение между материалом и нижней кромкой выходного канала затягивает фазу установления течения. Нагрузка прессования в этой фазе спадает нелинейно. Область с высокими интенсивностями напряжений в пересечении каналов становится стабильной и более компактной. Образуется выраженный перепад объемного напряжения в материале, перетекающем из входного канала в выходной через область с высокими интенсивностями напряжений;

- установившееся течение. Поведение очага пластической деформации стабильно. Характеризуется линейным характером изменения нагрузки прессования от перемещения пуансона. В моделируемых процессах с трением происходит линейный спад, без трения нагрузка имеет стационарный характер.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Процессы пластического структурообразования металлов / В. М. Сегал, В. И. Резников, А. Е. Дробышевский, В. И. Копылов и др. – Мн.: Навука і тэхніка. 1994. - 232 с.
2. Iwahashi, Y. An investigation of microstructural evolution during equal channel angular pressing / Iwahashi, Y., Z. Horita, M. Nemoto and T.G. Langdon // Acta Materialia. – 1997. – 45. – P. 4733-4741.
3. Балакин, В. Ф. Анализ возможностей различных технологических смазок в процессах с ИПД / В.Ф. Балакин, В.С. Гришин, И.А. Соловьева, О.В. Сергеева, К.С. Белан // Теория и практика металлургии 1-2 2012 с.52-55.
4. Клубович В.В., Степаненко А.В. Ультразвук и пластичность.- Минск: Наука и техника, 1976. - 446 с.
5. Шилин, А.Д., Ультразвуковая механоактивация порошковых материалов / А.Д. Шилин, В.В. Рубаник, В.В. Рубаник (мл.) // Перспективные материалы и технологии / Под. ред. В.В.Клубовича – Витебск: Изд-во УО «ВГТУ», 2013. – Гл. 30. – С. 630-651.
6. Рубаник, В. В. Влияние ультразвукового воздействия на силовые характеристики равноканального углового прессования цинка / В.В. Рубаник, В.В. Рубаник мл., М.С. Ломач, В.Ф. Луцко, В.В. Дедюро // Техническа акустика: разработки, проблемы, перспективы. Материалы межд. научн. конф. Витебск, Беларусь 25-28 мая 2021. - С.132-133.
7. Kumar, V.C. Reduction of the sliding friction of metals by the application of longitudinal or transverse ultrasonic vibration / V.C. Kumar, I.M. Hutchings // Tribology International. - 2004. - V. 37. – P. 833–840.

УДК 539.3:621.78

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ НА ПОВЕРХНОСТИ МАТЕРИАЛА ПРИ ДЕЙСТВИИ ПЛАЗМЕННОЙ СТРУИ

**Веремейчик А.И., Онысько С.Р., Хвисевич В.М., Холодарь Б.Г.,  
Хеук М.В., Ярмак М.А.**

Брестский государственный технический университет, г. Брест,  
Республика Беларусь

При поверхностной плазменной закалке используется действие движущихся концентрированных источников энергии, создающих направленную высокотемпературную газовую струю с плотность теплового потока на поверхности  $10^7 - 10^{10} \frac{Вт}{м^2}$ . Поверхностная закалка сталей связана с изменением фазовой структуры и физико-механических характеристик материала и созданием в нем мелкозернистого мартенсита. Для обеспечения этого процесса производится

нагрев материала до температур, превышающих температуру точки фазового превращения, с последующим быстрым охлаждением. Данные о температуре необходимы для оптимизации режимов плазменной закалки. Аналитическое решение температурных задач связано с определенными сложностями, касающимися учета лучистого теплообмена, составляющей до 30 % от общего баланса энергии, учета изменения физико-механических характеристик материала в зоне термического влияния и зависимости свойств материала от температуры. Для проверки результатов и подтверждения выявленных закономерностей теоретических исследований необходимы экспериментальные исследования теплового поля. Наиболее удобными для практического контроля термических процессов в сфере машиностроения являются бесконтактные методы определения температуры, основанные на регистрации теплового излучения, испускаемого обрабатываемой поверхностью [1].

С целью улучшения свойств поверхностного слоя проведена закалка режущего лезвия ножа гильотинных ножниц из стали 6ХВ2С. Схема термообработки приведена на рисунке 1. Обработка производилась на автоматизированном комплексе Advercut К6090Т с использованием разработанного узла крепления плазмотрона к элементам комплекса при следующих режимах: ток дуги  $I=30$  А, напряжение  $U=18$  В, давление аргона  $P_{Ar}=0,22$  МПа, давление азота  $P_{N_2}=0,3$  МПа, расход аргона  $V_{Ar}=0,3$  л/ч., расход азота  $V_{N_2}=0,08$  л/ч. Скорость движения плазмотрона варьировалась в диапазоне  $v=10\dots25$  мм/с.



**Рисунок 1 – Схема обработки ножа гильотинных ножниц плазменной струей**

Для экспериментального определения температурного поля на поверхности материала в зоне действия плазменной струи с целью подтверждения теоретических результатов [2] применялся компьютеризированный высокотемпературный трехзональный тепловизор ИТ-3СМ. Тепловизор ИТ-3СМ предназначен для исследования термических процессов обработки изделий из черных металлов и способен измерять температуру в двух температурных диапазонах: от 800 до 1500 °С или от 1500 до 3000 °С.

ИТ-3СМ состоит из цифровой видеокамеры специального назначения, регистрирующей тепловое излучение в трех перекрывающихся зонах спектра, которые лежат в диапазоне 630–830 нм, и управляющего компьютера (рисунок 2).

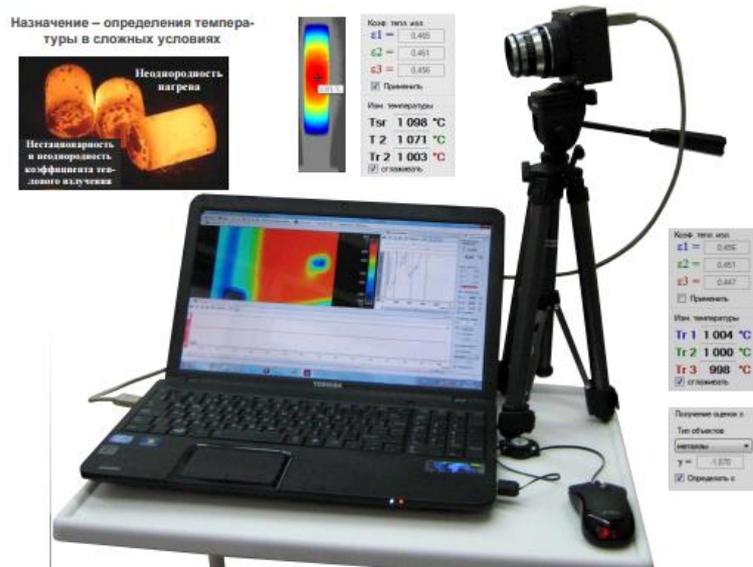


Рисунок 2 – Общий вид высокотемпературного трехзонального тепловизора ИТ-3СМ

На рисунке 3 приведена зависимость максимальных значений температурного поля от времени и температурное поле на поверхности детали при скорости перемещения источника нагрева  $v=10$  мм/с.

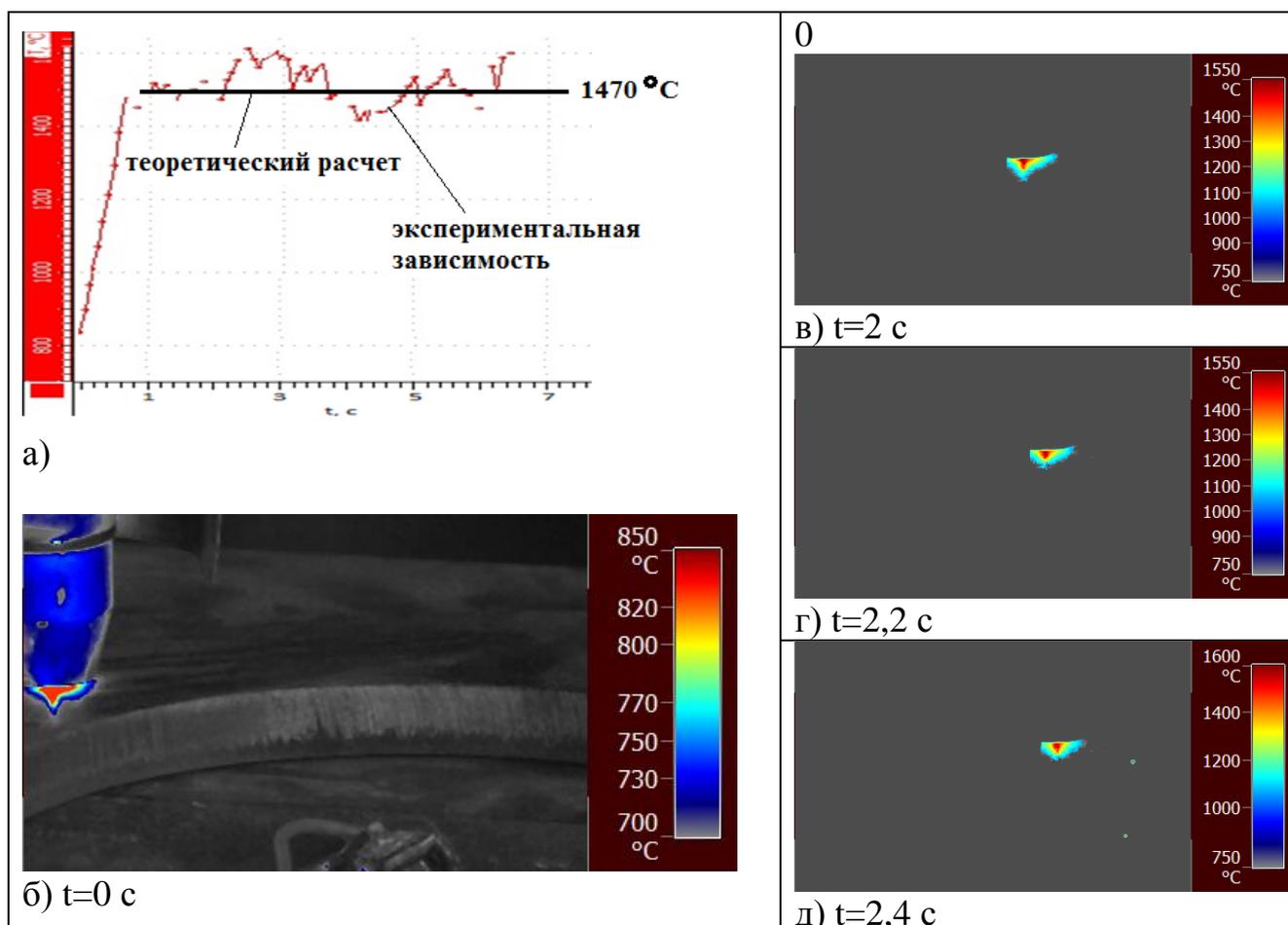


Рисунок 3 – Временная зависимость максимальных значений температуры (а) и формируемое плазменной струей температурное поле в различные моменты времени (б–д) при  $v=10$  мм/с, расстояние от объектива до нагреваемой поверхности  $z=0,9$  м, отношение диаметра линзы  $D$  к фокусному расстоянию  $f$ :  $D/f=1/16$ ,  $f=57$  мм

Теоретические исследования проводились в широком диапазоне параметров плазменной закалки ( $I=10-35$  А,  $U=8-50$  В,  $v=1-100$  см/с,  $r_f=0,05-0,5$  см) [2]. Уравнение для расчета температуры  $T$  в точке тела от действия перемещающегося с постоянной скоростью  $V$  вдоль оси  $x$  нормально-кругового источника теплоты в подвижной системе координат для одной полосы упрочнения имеет вид [3]:

$$T(x, y, z, t) = \left[ 2P_0 \exp\left(-\frac{Vx}{a}\right) \left(c\gamma(4\pi a)^{3/2}\right) \right] \times \int_0^t \frac{1}{\sqrt{\xi(t_0 + \xi)}} \exp\left[-\frac{z^2}{4a\xi} - \frac{r^2}{4a(t_0 + \xi)} - \frac{V^2(t_0 + \xi)}{4a}\right] d\xi, \quad (1)$$

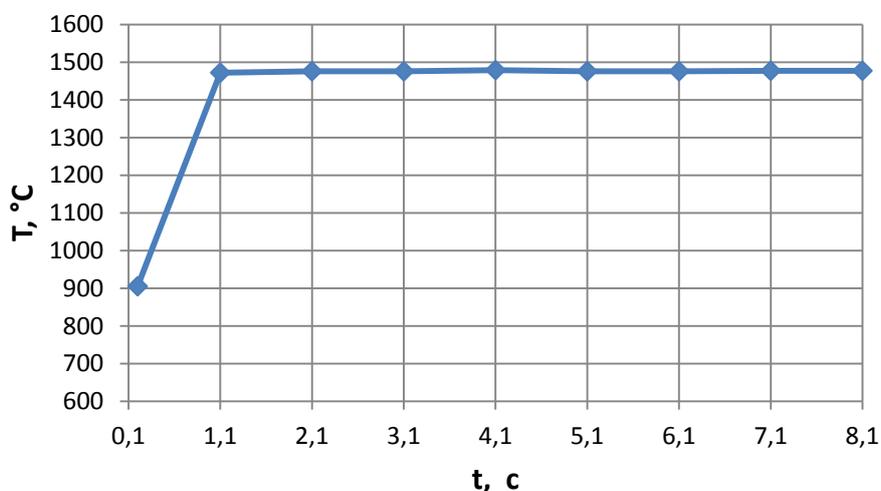
где  $t$  – время,  $z$  – координата вдоль оси воздействия,  $P_0 = q_0 \frac{\pi}{k}$  – эффективная

мощность источника тепла,  $k = \frac{1}{(r_f)^2}$  – коэффициент сосредоточенности пото-

ка;  $q_0$  – плотность теплового потока;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности материала,  $a = \lambda/c\rho$ ,  $c$  – удельная теплоемкость,  $\rho$  – плотность материала;  $r$  – текущий радиус;  $t_0 = \frac{1}{4ak}$  – постоянная

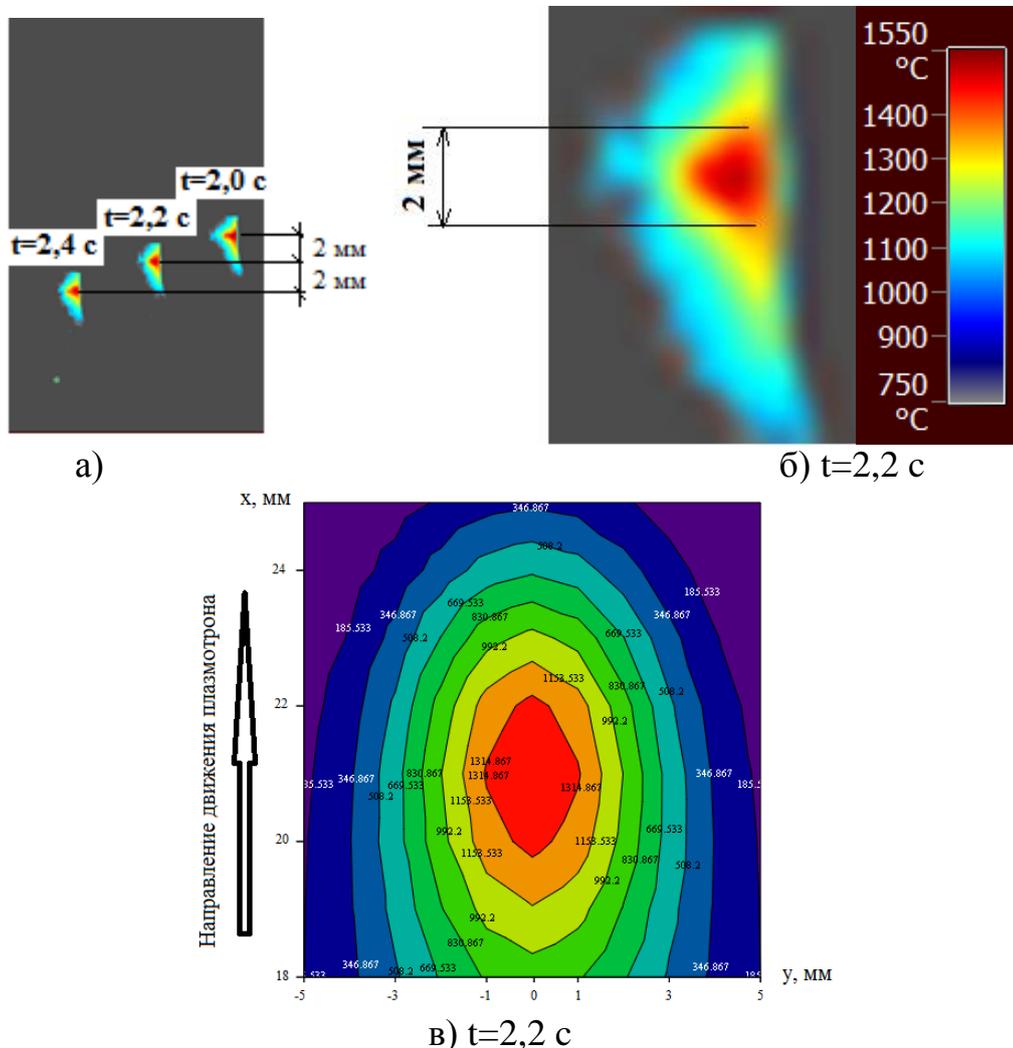
времени.

С использованием разработанной программы на языке FORTRAN проведен расчет температурных полей при действии движущегося нормально-кругового источника теплоты как в центре пятна нагрева, так и на поверхности материала. Типичная зависимость температурного поля от времени при  $I=30$  А,  $U=18$  В,  $r_f=2,5$  мм,  $v=10$  мм/с, КПД плазмотрона  $\eta=0,72$ , температуре плавления стали  $T^{пл} = 1550$  °С,  $\rho = 7860 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ ,  $\lambda = 38 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{°С}}$ ,  $c = 745 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{°С}}$  приведена на рисунке 4.



**Рисунок 4 – Зависимость максимальной температуры от времени в центре пятна нагрева с координатой  $x=22$  мм**

По результатам экспериментальных исследований установлен размер пятна нагрева. Для этого проведено наложение пятен для различных моментов времени с интервалом 0,2 с (рисунок 5, а) при скорости движения плазмотрона  $v=10$  мм/с. Установлено, что размер пятна составляет около 2 мм (рисунок 5, б), что подтверждает результаты теоретического расчета с помощью разработанной программы при  $r_f=0,25$  см (рисунок 5, в).



**Рисунок 5 – Распределение теплового поля на поверхности материала при  $v=10$  мм/с  
а, б – экспериментальные результаты; в) теоретический расчет**

Полученные результаты экспериментальных и теоретических исследований позволят оптимизировать режимы термообработки с последующим их уточнением в процессе технологических экспериментов плазменной закалки.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Фираго, В. А., Левкович, Н. В., Тягунов, О. В., Сакович, И. А., Семенович, С. Н., & Стецко, И. П. (2016). Высокотемпературный трехзональный тепловизор высокого разрешения ИТ-3СМ.
2. Веремейчик, А. И. Температурное поле в ноже гильотинных ножниц при действии движущегося нормально-кругового источника нагрева / А. И. Веремейчик, В. М. Хвисевич, Б. Г. Холодарь // Новые технологии и материалы, автоматизация производства: сборник статей / Брестский государственный технический университет. – Брест : Издательство БрГТУ, 2022. – С. 188–193.

## **АНАЛИЗ И КЛАССИФИКАЦИЯ СОВРЕМЕННЫХ СВЕРХТВЁРДЫХ МАТЕРИАЛОВ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В КАЧЕСТВЕ ЛЕЗВИЙНОГО ИНСТРУМЕНТА ДЛЯ ТОКАРНОЙ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ЗАКАЛЁННОЙ СТАЛИ**

**Белозёров Р. Ф.<sup>1</sup>, Горбунов В. П.<sup>2</sup>**

1) Филиал БрГТУ «Политехнический колледж»,  
г. Брест, Республика Беларусь

2) Брестский государственный технический университет,  
г. Брест, Республика Беларусь

В современных условиях развития машиностроения при изготовлении деталей требуется уделять особое внимание следующим основным факторам: технологии и способу обработки деталей, оборудованию, а также инструменту. От этих трёх ключевых составляющих во многом и зависит производительность труда, эффективность производства, а, следовательно, и экономический эффект.

Можно отметить, что активно внедряемые и используемые новые методы формообразования заготовок не исключают их механической обработки в виде чистовых и отделочных операций. Вместе с тем требуется для их реализации новое высокоточное и высокопроизводительное технологическое оборудование.

При обработке закалённых цилиндрических деталей твёрдостью 50...55 НРС<sub>Э</sub> для получения шероховатости поверхности Ra 1,25...0,63 мкм и точности 6-7 квалитета используют технологический метод обработки – шлифование. Недостатком этого процесса является высокая температура в зоне контакта инструмента и заготовки, что приводит к изменению структуры поверхностного слоя детали, а, следовательно, изменению его физико-механических свойств. Данный недостаток можно избежать применением лезвийного инструмента из сверхтвёрдого материала (далее СТМ), обработка которым заменяет процесс шлифования. Инструменты из СТМ обладают высокой твёрдостью, теплопроводностью, износостойкостью, вибростойкостью, низким коэффициентом трения. Основное распространение из сверхтвёрдых материалов получили инструменты на основе алмазов и кубического нитрида бора (далее cNB).

Инструменты на основе алмазов обладают следующими достоинствами: наивысшей твёрдостью, высокой износостойкостью и коррозионной устойчивостью. Однако при вышеперечисленных преимуществах, инструменты на основе алмазов имеют также ряд недостатков, в число которых входят недостаточная ударная вязкость, относительно небольшая теплостойкость, около 700 °С и химическая нестабильность самого алмаза при высоких температурах в присутствии материалов на основе железа. Это ограничивает применение алмаза в качестве инструмента при обработке закалённых сталей, но при этом рекомендовано использовать при обработке цветных сплавов, которые инертны к соединениям с углеродом. Также не мало важно то, что стоимость природных алмазов довольно высока. Поэтому, исходя из всего вышеперечисленного, с развитием технологий возникла необходимость разработки доступных сверх-

твердых материалов, способных работать в процессах резания с высоким нагревом в зоне контакта инструмента и заготовки.

Получение синтетического алмаза с физико-химической точки зрения представляет собой фазовое превращение углерода из графита в алмаз при высоком давлении и температуре. Для того чтобы осуществить этот процесс превращения необходимо наличие технологического оборудования, в виде больших прессовых установок, способных создавать это высокое давление и нагревать реакционные ячейки до температуры плавления стали. С технической точки зрения искусственно получить и синтезировать алмаз стало возможным только в 1953-1954 гг. Впервые синтез алмаза был осуществлен в 1953 г. в Швеции в лаборатории фирмы «АСЕА», а затем независимо повторен в США в 1954 г. в лаборатории фирмы «General Electric». Затем также независимо от других исследователей был выполнен в России в лаборатории Института физики высоких давлений Академии наук СССР [9].

Важным толчком в развитии получения абсолютно новых инструментальных материалов стало появление в 1957 году синтетического материала на основе кубического нитрида бора, получившего название «Боразон», который был получен Робертом Венторфом для компании «General Electric». В СССР кубический нитрид бора был впервые синтезирован в 1960 г. в лаборатории Института физики высоких давлений Академии наук СССР под руководством академика Л. Ф. Верещагина и получил название «Эльбор» (Ленинградский боразон) [3].

Сверхтвёрдые материалы делятся на три большие группы как указано в работе [9]. К первой из них относятся монокристаллы СТМ. Ко второй – однородные поликристаллические сверхтвёрдые материалы (далее ПСТМ). К третьей – однородные и неоднородные композиты. В качестве основных критериев классификации служат:

- 1) Характеристика структурного строения, исходя из степени кристалличности, числа фазовых составляющих и однородности структуры.
- 2) Технология получения, которая определяет основные физико-химические свойства получаемого СТМ.

В свою очередь, каждая из указанных групп делится на три подгруппы [9]. К первой подгруппе можно отнести способы, используемые для получения монокристаллической структуры. К ним относятся кристаллизация из расплава при высоком динамическом давлении и кристаллизация из расплава при высоком статическом давлении на основе углерода, а также фазовое превращение или кристаллизация из расплава при высоком динамическом давлении на основе cNB. Ко второй подгруппе можно отнести способы получения поликристаллической и композитной структур. К ним относятся горячее изостатическое прессование и спекание в газостатах как для углерода, так и cNB. К третьей подгруппе можно отнести способы получения композитной структуры при помощи лазерного облучения, плазменного осаждения, детонационного напыления на основе углерода, а также лазерное и радиационное облучение, плазменное осаждение для получения монокристаллической структуры на основе cNB.

СТМ выпускают в виде порошков или ПСТМ, а также используют в составе инструментальных композиционных материалов как наполнители.

ПСТМ используют в качестве лезвийных инструментов при точении и фрезеровании высокопрочных и высокоабразивных как металлических, так и неметаллических материалов. К металлическим обрабатываемым материалам относятся высокопрочные и закаленные стали, жаропрочные сплавы, а также различные наплавленные материалы. К группе неметаллических материалов относятся алюминиевые сплавы с высоким содержанием кремния, угле- и стеклопластики. При этом наиболее существенно различаются инструменты на основе алмаза и сNB.

Основные физико-механические свойства ПСТМ на основе алмаза и сNB представлены в таблице 1. Сравнительный анализ данных физико-механических свойств, полученных при обзоре литературных источников [8] показывает, что микротвёрдость сNB достигает максимальной отметки в 40 ГПа и практически в два раза меньше микротвёрдости алмаза, которая составляет 100 ГПа. Показатель микротвёрдости является практически единственным недостатком сNB перед алмазом. В остальном сNB имеет ряд преимуществ перед инструментом, изготовленным на основе алмаза. В число этих преимуществ входят максимальные значение предела прочности при изгибе и сжатии сNB, которые больше чем у алмаза, что даёт возможность выдерживать более высокие нагрузки, а также химическая инертность и теплостойкость сNB, составляющая 1200 К по сравнению с 800 К для алмазов, что даёт возможность обрабатывать закаленные стали, жаропрочные сплавы и наплавленные покрытия на основе металлов группы железа.

Таблица 1 – Физико-механические свойства ПСТМ на основе алмаза и сNB

Физико-механические свойства		ПСТМ на основе	
		алмаза	сNB
Микротвёрдость $H_{\mu}$ , ГПа		60-100	30-40
Теплостойкость, К		800	1200
Предел прочности	при изгибе $\sigma_{и}$	0,9-1,0	0,4-1,5
	при сжатии $\sigma_{с}$	0,4-5,0	2,0-6,5

Поскольку при дальнейших исследованиях будет рассматривается точение цилиндрических деталей из закалённой стали далее будем рассматривать лезвийный инструмент из СТМ на основе сNB.

Согласно стандарту ISO 1832-2012, композиты на основе сBN делятся на три группы – ВН, ВL, ВС.

Композиты группы ВН – с количеством сBN в диапазоне 70 – 95 об. %, являются существенно монофазными, но гетерогенными по своей структуре.

К группе ВL относятся композиты с 45 – 65 об. % сBN. Матрица, дисперсность структуры которой соответствует субмикронному диапазону, мультифазна и имеет сложный химический состав на основе керамических компонент с TiN, Ti(C, N), TiC, TaN, TiB<sub>2</sub>, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, SiC, МАХ-фаз.

Группа ВС объединяет композиты на основе cBN с защитными покрытиями.

Режущие инструменты из композитов систем «cBN-TiN», «cBN-TiC» (содержание cBN 50 – 55 об. %), позволяют выполнять чистовое точение закаленных сталей (ХВГ, ШХ15, 30ХГСА, 40Х, У8) при скоростях резания 180 – 270 м/мин, что обеспечивает производительность до 9000 мм<sup>3</sup>/мин.

Как показывает анализ литературных источников [8], наиболее применяемыми материалами на основе cBN являются так называемые композиты, основное обозначение и свойства которых приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Обозначение и основные свойства композитных материалов

Марка	Название	ТвёрдостьHV, ГПа	Теплостойкость, °С
Композит 01	Эльбор-Р	60-80	1100-1300
Композит 02	Белбор	60-90	900-1000
Композит 03	Исмит	60	1000
Композит 05	Композит	70	1000
Композит 09	ПКНБ	60-90	1500
Композит 10	Гексанит-Р	50-60	750-850

Лезвийный инструмент на основе композиционных СТМ для токарной обработки деталей выпускается в виде пластин и вставок. Согласно ГОСТ Р 50300-92 «Резцы токарные со сменными режущими пластинами из сверхтвёрдых материалов» данные резцы предназначены для тонкого, чистового и получистового точения и растачивания деталей из закаленных сталей с твердостью до 62 HRC с точностью обработки по 6-9 квалитетам на станках токарной и расточной групп, станках с ЧПУ и станках, встроенных в автоматические линии. Величина площадки износа резца по задней поверхности в зависимости от угла при вершине не должна превышать при  $\epsilon \geq 90^\circ$  0,11 мм, а при  $\epsilon < 90^\circ$  0,13 мм.

Широкое использование процесса шлифования закалённых конструкционных сталей ставит задачу замены данного вида абразивной обработки точением инструментом из композитов и назначения оптимальных режимов резания.

Таблица 3 – Рекомендуемые режимы резания при точении закалённых сталей

Марка композита	Твёрдость стали, HRC <sub>э</sub>	Характер процесса резания	Режимы резания			Период стойкости, мин
			v, м/мин	s, мм/об	t, мм	
К01, К02	61-63	без удара	75	0,2	0,8	23
К05	52-54		75	0,1	0,8	52
К10	57-59		75	0,1	0,3	69
К10	57-59	с ударом	60	0,07	0,2	52

В дальнейшем будем рассматривать обработку закалённых сталей марок 40 и 40Х обладающими твёрдостью 50-55 HRCэ. Исходя из условий обработки и анализа данных таблиц 2 и 3 наиболее подходящими материалами режущей части инструмента будут следующие марки композитов: K05 (Композит) и K10 (Гексанит-Р). Композиты K01 и K02 в нашем случае использовать не рекомендуется, так как они предназначены для процесса обработки, который носит безударный характер и твёрдость обрабатываемого материала при этом составляет 61-63 HRCэ, что на порядок выше твёрдости наших образцов закалённой стали. В свою очередь композит K10 по сравнению с композитом K05 может работать не только безударно, но и ударно.

Целью проведения испытаний является обработка закалённой стали марок 40 и 40Х токарными резцами из композита 10 с определением оптимальных режимов резания: скорости резания, подачи и глубины, при стойкости инструмента не менее 60 минут и обеспечение шероховатости обрабатываемой поверхности не более 0,32 мкм.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Васильева, Н. В. Применение режущих инструментов из синтетических сверхтвёрдых материалов для повышения экологичности и качества механической обработки / Н. В. Васильева // Актуальные вопросы технических наук: материалы III Междунар. науч. конф. – Пермь : Зебра, 2015. – С. 91–94.

2. Грубый С. В. Исследование режущих свойств резцов из нитрида бора С. В Грубый., В. В. Лапшин. – М. : ФГБОУ ВПО МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2012. – С. 61–74.

3. Дигонский С.В. Некоторые сведения из истории синтеза кубического нитрида бора для лезвийного режущего инструмента (Часть 1). – Альтернативная энергетика и экология, 2014, № 9, с. 49–57.

4. Зубарь, В. П. Лезвийная обработка закалённых сталей и чугунов взамен шлифования [Электронный ресурс] / В. П. Зубарь, А. Г. Тимчук, М. В. Чопенко. – Режим доступа: [http://repository.kpi.kharkov.ua/bitstream/KhPIPress/20359/1/STvMS\\_2010\\_5\\_Zubar\\_Lezviynaya.pdf](http://repository.kpi.kharkov.ua/bitstream/KhPIPress/20359/1/STvMS_2010_5_Zubar_Lezviynaya.pdf).

5. Клименко, С. А. Технологические возможности токарных инструментов из поликристаллических сверхтвёрдых композитов на основе cBN / С. А. Клименко // Инженер-механик. – 2017. – № 2. – С. 32-33.

6. Клименко С. А. Технологические возможности инструментов оснащённых композитами на основе кубического нитрида бора / С. А. Клименко, М. Ю.Копейкина, А. О. Чумак // «Сучасні технології в машинобудуванні». – 2017. – вип. 12. – С. 54–60.

7. Корнеев, В. М. Повышение качества изделий на этапе процесса механической обработки, В. М. Корнеева, С. С. Корнеев // Технология машиностроения – № 10. – 2014. – С. 16–20.

8. Мартиновская, О. В. Перспективы применения высокоскоростной обработки материалов на современном этапе развития отрасли / О. В. Мартиновская, В. И. Жорник // Новые технологии и материалы, автоматизация производства : сборник статей международной научно-технической конференции, Брест, 20–21 октября 2022 г. – Брест : БрГТУ, 2022. – С. 136–142.

9. Новиков Н. В. под ред. Инструменты из сверхтвёрдых материалов / Н.В. Новиков. - Москва : Машиностроение, 2005. - 555 с.

10. Рогов, В. А. Высокоскоростная обработка закалённых заготовок /В. А. Рогов. // Технология машиностроения. – 2014. – № 3. – С. 16–19.

## **РАЗРАБОТКА ПРОГРАММЫ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ТОЧЕК ТЕЛА ПРИ СКАНИРУЮЩЕЙ ЛАЗЕРНОЙ ЗАКАЛКЕ**

**Веремейчик А.И., Нерода М.В., Холодарь Б.Г.**

Брестский государственный технический университет, г. Брест,  
Республика Беларусь

Воздействие подвижного теплового потока высокой интенсивности используется для модификации свойств материалов в приповерхностной зоне [1]. Задачей воздействия является целенаправленное изменение фазового состава материала и его микроструктуры, что в свою очередь ведет к требуемому изменению механических свойств материала. При этом основным вопросом является подбор оптимального режима теплового нагружения, который зависит прежде всего от уровня и скорости нагрева и последующего охлаждения тела. В связи с этим расчеты температурных полей в соответствующих зонах материала имеют первостепенное значение.

В научно-технической литературе известны решения тепловых задач, посвященных определению пространственно-временных распределений температуры, создаваемых стационарными или движущимися источниками тепла [1–7]. В зависимости от требуемых условий источники тепла могут быть распределенными по всей нагружаемой поверхности тела либо сосредоточенными на ее ограниченном участке. В последнем случае речь может идти о форме пятна нагрева и о законе распределения теплового воздействия по этому пятну. Для движущихся источников энергии при вычислениях необходимо задать конкретную траекторию движения зоны прямого теплового воздействия лазерного луча. Настоящая программа разработана для случая, когда наряду с движением ядра потока вдоль намеченной дорожки оно одновременно периодическим образом смещается в поперечном направлении, двигаясь по траектории, которую можно представить как набор выходящих одна из другой последовательных поперечных линий, причем по условиям работы установки в точках этих линий интенсивность энергетического воздействия может изменяться.

В используемой в научно-исследовательской лаборатории плазменных и лазерных технологий БНТУ установке при поверхностной обработке излучением волоконного иттербиевого лазера мощностью 1 кВт со сканирующей лазерный луч головкой производится отключение мощности потока лазерного излучения после прохождения нескольких поперечных линий, т.е. обрабатываемая дорожка представляет собой последовательность одинаковых по воздействию зон, состоящих из участков непосредственного нагружения (пятно воздействия) и равных с ними по времени “ненагруженных” промежутков. Такой способ при малом радиусе кругового ядра лазера дает возможность создавать в материале

тепловое поле определенной интенсивности при заданной номинальной мощности установки, что учтено при разработке программы.

В качестве исходных кинематических данных принимались скорость движения лазерной головки вдоль дорожки, ширина дорожки, число поперечных линий на пятне воздействия и частота повторений прохождения двух взаимосвязанных линий, что позволяет определить период времени, соответствующий возврату оси луча в точку с фиксированной поперечной координатой. Задаваемое на установке число линий  $N_{lin}$  может быть нечетным или четным (во время испытаний число линий соответствовало значениям 7 и 10), поэтому на пятне сканирования уместится целое или полуцелое число периодов поперечного движения луча, равное  $N_{lin} / 2$ . В связи с тем, что оплавление поверхности обрабатываемого материала происходит в круге определенного радиуса, а не только в точках попадания оси луча лазера, при небольших скоростях движения головки лазера происходит непрерывное слияние зон обработки (пятно плюс промежутки), уточнение ситуации может быть проведено только при достаточно больших скоростях движения лазерной головки, когда пятна и промежутки между ними явным образом выделяются. Это дает возможность определить продольную составляющую скорости сканирования, которая является одинаковой для любых скоростей движения лазерной головки при одном и том же числе линий на пятне и частоте их прохождения.

При составлении программы вычислений температурных полей предполагается, что наличие постоянной продольной и периодической поперечной скоростей сканирования позволяет считать ось луча при сканировании движущейся вдоль дорожки по некоторой синусоиде.

С точки зрения кинематики движение оси луча можно представить как сумму продольного переносного и относительного продольного и поперечного движений, причем скорость переносного движения совпадает со скоростью лазерной головки. Для определения продольной относительной скорости был использован опыт по нагружению плоского образца со скоростью перемещения головки, равной  $V_e = V = 20000 \text{ мм/мин}$  ( $100/3 \text{ см/сек}$ ). На рисунке 1 показан след от воздействия на некотором участке дорожки.

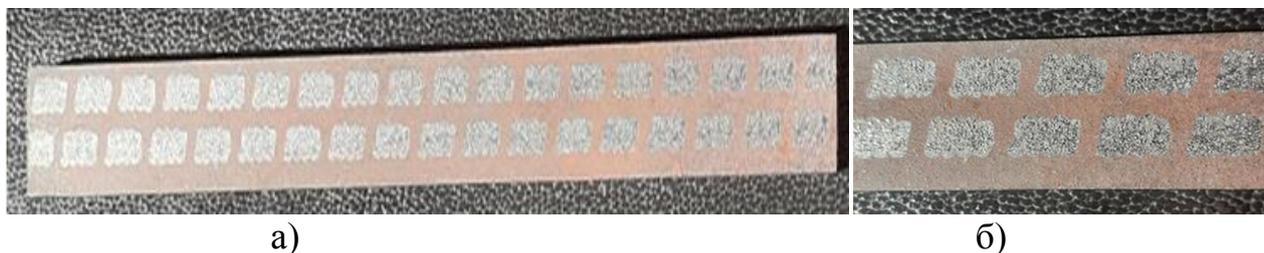


Рисунок 1 – Обработанный образец (а) и его участок (б)

Хотя к концу дорожки след становится более оплавленным за счет общего повышения температуры образца с течением времени воздействия, при большом числе образовавшихся зон обработки можно с достаточной точностью определить длину одной зоны, как отношение общей длины дорожки ( $L \approx 198 \text{ мм}$ ) к числу этих зон ( $N = 18$ ). После этого, записав выражение для длины зоны  $L_z$  в виде:

$$L_z = V_e \frac{N_{lin}}{2} T_{laz} + (V_e + V_r) \frac{N_{lin}}{2} T_{laz},$$

находим относительную скорость  $V_r = 2 \left( \frac{L_z}{N_{lin} T_{laz}} - V_e \right)$ . Таким образом, найден-

ное значение  $V_r$  можно принять как достаточно обоснованное и использовать его для режимов с другими значениями скорости переносного движения.

Для источника нагрева, расположенного в точке  $A$  с координатами  $x, y, z$ , температура в любой точке тела в любой момент времени описывается выражением:

$$T(r, t) = \frac{Q}{8(\pi a t)^{3/2}} \exp \left[ -\frac{r^2}{4at} \right], \quad (1)$$

где  $Q$  – выделение тепла в точке в единицу времени,  $a = \lambda / c\rho$  – коэффициент температуропроводности,  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности,  $c$  – теплоемкость,  $\rho$  – плотность материала,  $t$  – время,  $r^2 = (x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2$  – расстояние от источника до точки  $A_0$  с координатами  $x_0, y_0, z_0$ , в которой определяется температура. Под  $T$  понимается приращение температуры над исходным уровнем температуры тела в данной точке в заданный момент времени (исходная температура во всех точках принята одинаковой и равной нулю).

Поскольку для рассматриваемого случая тепловое воздействие распределено по некоторой поверхности тела, необходимо рассматривать действие совокупности точечных источников, что приводит к необходимости интегрирования выражения (1) в пределах этой поверхности:

$$T_s(r, t) = \int \left\{ \int T(r, t) ds \right\} d\xi, \quad (2)$$

где  $\xi$  – переменная интегрирования по времени от начального значения  $\xi_0 = 0$ ,  $S$  – переменная интегрирования по поверхности.

Распределение интенсивности воздействия по площади ядра подчинено [2, 3] гауссовому закону (нормально-круговое распределение)  $q = q_0 \exp(-\gamma r^2)$ , где  $r$  – расстояние от оси луча,  $\gamma$  – коэффициент сосредоточенности потока. Поскольку при этом  $r$  меняется от нуля до бесконечности, при решении задач зона ядра потока ограничивается некоторым радиусом  $R_f$ , так что выражение для  $q$  можно записать в виде  $q = q_0 \exp\left(-\left(r/R_f\right)^2\right)$ . Зависимость функции  $\exp(-(r/R_f)^2)$  от соотношения  $r/R_f$  приведена на рисунке 2.

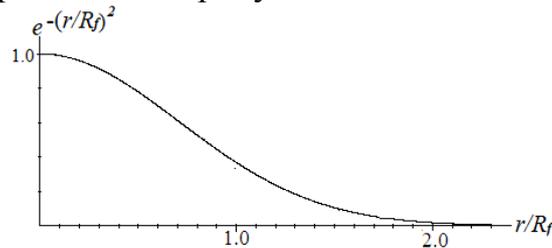


Рисунок 2 – Функция  $\exp(-(r/R_f)^2)$

Поскольку в нашем случае при движении луча по дорожке предполагается изменение потока во времени, то множитель  $q_0$  следует записать в виде  $q_0 \cdot F(t)$ , где функция времени  $F(t)$  должна описывать фактический закон изменения интенсивности потока и, таким образом, должна быть введена в подинтегральное выражение (2) при значениях  $0 \leq F(t) \leq 1$ . Эту функцию мы далее представляем в виде произведения  $F(t) = Coef(t) \cdot G_f(t)$  так, чтобы функция  $Coef(t)$  учитывала изменение общей мощности источника (например, ее отключение до значения  $F(t) = 0$  на участках промежутка между пятнами), а  $G_f(t)$  – изменение мощности при нахождении оси луча вблизи продольных краев дорожки. Необходимость введения функции  $G_f(t)$  связана с тем, что возле краев дорожки (рисунок 1) относительная скорость поперечного движения луча принимает значения близкие к нулю и равные ему, что в реальных условиях работы установки вызывает возможность значительного перегрева материала.

Если рассматривать вопрос об определении температуры для точек, находящихся на достаточном удалении от оси луча источника, то внутренний интеграл в (2) можно определить, относя при этом все энергетическое воздействие к центру тяжести сечения потока, т.е. к оси луча, и для определения расстояния между источником и рассматриваемой точкой использовать приведенное выше в (1) определение этого расстояния. Однако учитывая наличие достаточно большой зоны оплавления вдоль линий пятна воздействия на поверхности образца (рисунок 1), более правильным будет воспользоваться расчетной схемой, приведенной на рисунке 3, которая учитывает, что каждая точка ядра потока имеет не только свой уровень интенсивности воздействия, но и свое расстояние до рассматриваемой точки  $A_0$  с координатами  $x_0, y_0, z_0$ .

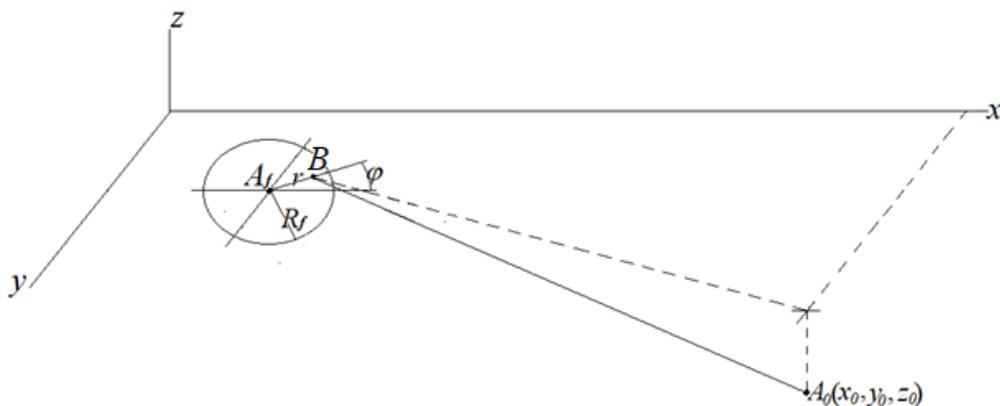


Рисунок 3 – Расстояние между точкой пятна и выделенной точкой  $A_0$  тела

При этом подинтегральное выражение в (2) включает в себя экспоненциальную переменную составляющую  $\Psi$  с аргументом, зависящим от времени, координат выделенной точки  $A_0$  и окружающих ее точек, которые могут быть взяты дополнительно в прилегающем к ней объеме материала, текущих координат точки  $A_f$  оси луча и положения точки “B” внутри ядра потока (переменные  $r$  и  $\varphi$  на рисунке 3):

$$\Psi = \exp[-(r^2 (1 + 4a \cdot s / R_f^2) + ((x_k - x_f)^2 + (y_k - y_f)^2 + z_k^2 - 2r(x_{of} \cos(\varphi) + y_{of} \sin(\varphi))) / (4a \cdot s))], \quad (3)$$

где  $s=t_k-t_f$ ,  $x_{of}=x_0-x_f$ ,  $y_{of}=y_0-y_f$ ,  $x_k$ ,  $y_k$ ,  $z_k$  – координаты точки, выделенной внутри объема вокруг точки  $A_0$ .

В формуле (3) подстрочным индексом “Г” отмечено значение координат оси луча на поверхности образца в соответствующий текущий момент времени  $t_f$ . Само интегрирование по времени  $t_f$  должно производиться от начального момента  $t_0=0$  до заданного конечного  $t_k$  значения  $t_k \geq t_f$  и, таким образом, будет учитывать смещение оси потока вдоль дорожки и соответствующий общий разогрев тела. Окончательно вместо (2) с учетом сделанных выше определений получаем расчетную формулу в виде

$$T = \frac{q_0}{8\rho c (\pi a)^{3/2}} \int_0^s \int_0^{R_f} \int_0^{2\pi} \frac{F \cdot \Psi}{s^{3/2}} r dr d\varphi ds. \quad (4)$$

Наличие внутри подинтегрального выражения тригонометрических функций не позволяет получить для него более удобного аналитического представления, что вызывает необходимость в одновременном численном интегрировании по  $r$  и по  $\varphi$  и в связи с этим заметно увеличивает длительность проведения вычислений. Как сам интеграл (4), так и его внутренние интегралы в программе вычисляются по методу Симпсона, в связи с чем области изменения соответствующих переменных должны быть разбиты на четное число интервалов ( $N_{Simps} \geq 2$ ).

В настоящее время программа работает в тестовом режиме, проводится верификация результатов расчета.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Теплопроводность твердых тел / Г. Карслоу, Д. Егер. – М. : Наука, 1964. – 488 с.
2. Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов: Справочник / Н. Н. Рыкалин, А. А. Углов, И. В. Зуев, А. Н. Кокора. – М. : Машиностроение, 1985. – 496 с.
3. Рыкалин, Н. Н. Расчеты тепловых процессов при сварке / Н. Н. Рыкалин. – М. : ГНТИ Машиностроительной литературы, 1951. – 296 с.
4. Теория температурных напряжений/ Б. Боли, Дж. Уэйнер – М. : Мир, 1964. – 518 с.
5. Влияние режимов лазерной закалки на свойства стали 40X13 / О. М. Мицирук [и др.] // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2023. – Т. 68, No 2. – С. 103–112.
6. Akbari, M. Geometrical Effects on the Temperature Distribution in a Half-Space Due to a Moving Heat Source / M. Akbari, D. Sinton, M. Bahrami // J. Heat Transfer. – 2011. – Vol. 133, iss. 6. – Art. ID 064502 (10 p.). <https://doi.org/10.1115/1.4003155>
7. Zubair, S. M. Temperature solutions due to time-dependent moving line heat sources / S. M. Zubair, M. A. Chaudhry // Heat Mass Transfer. – 1996. – Vol. 31. – P. 185–189. <https://doi.org/10.1007/BF02333318>

## СТРУКТУРА ПОЛИОЛЕФИНОВ, МОДИФИЦИРОВАННЫХ ГРАФЕНОПОДОБНЫМИ ЧАСТИЦАМИ

**Возняковский А.А.<sup>1</sup>, Овчинников Е.В.<sup>2</sup>, Хвисевич В.М.<sup>3</sup>,  
Чекан Н.М.<sup>4</sup>, Веремейчик А.И.<sup>3</sup>, Хусанов А.Ж.<sup>5</sup>**

- 1) Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе Российской академии наук, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация
- 2) Гродненский государственный университет им. Янки Купалы, г. Гродно, Республика Беларусь
- 3) Брестский государственный технический университет, г. Брест, Республика Беларусь
- 4) Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь
- 5) Кокандский государственный педагогический институт им. Муками, г. Коканд, Узбекистан

Роль полимеров и композитов на их основе приобрела огромное значение в современном обществе благодаря широкому спектру применения [1–5]. Композиты полимеров с одним или несколькими компонентами обычно имеют улучшенные характеристики за счет отдельных компонентов, составляющих данный материал или синергии взаимодействия фаз, формирующих данный композит. Благодаря широкому спектру производственных процессов и возможностей для получения разнообразных углеродных материалов особый интерес представляют углеродные нанотрубки (УНТ) и графены (ГПС), т.к. в настоящее время это наиболее востребованные материалы в производстве, после графита и углеродной сажи. Основное направление применения УНТ, ГПС – это создание полимерных композитов с улучшенными характеристиками. Получаемые полимерные композиты (композиционные наноматериалы (КНМ)) широко используются для электрохимического хранения и преобразования энергии, в микроэлектронике, для механического, реологического и трибомеханического применения и т. д. Хотя УНМ обладают широким спектром свойств, их инертная поверхность и легкость создания различного типа агломератов создают серьезные проблемы при их применении, особенно на этапах предварительной обработки наноматериалов для последующего получения химически чистого или функционализированного нанопродукта.

Углеродные материалы можно в широком смысле разделить на традиционные углеродные материалы, такие как углеродные сажи и активированные угли, а также наноструктурированные углероды, в том числе УНТ (углеродные нанотрубки), графен, фуллерены и др. Большая удельная поверхность, высокая проводимость, высокие механические прочность и хорошая термическая стабильность углеродсодержащих материалов являются основными причинами их

широкого применения. С тех пор как в 1990-х годах были открыты УНТ, они стали использоваться для самых разных целей во многих отраслях промышленности и, в частности, в нанотехнологиях [3]. УНТ имеют цилиндрическую форму со свернутыми графитовыми плоскостями и с более чем одним закрытым концом, имеющим полусферическую фуллереновую структуру. Диаметр УНТ обычно составляет около 20–30 нм, а длина измеряется микрометрами. Углеродные нанотрубки характеризуются большим соотношением сторон находящемся в пределах более 1000 раз. Обычно классифицируют одностенные углеродные нанотрубки (ОУНТ) с одним слоем графена, свернутым в цилиндр, и многостенные углеродные нанотрубки (МУНТ) с несколькими графеновыми цилиндрами, скрученными вместе с промежутками между слоями 0,34 нм.

В зависимости от строения УНТ можно выделить три типа ориентации: зигзагообразная, кресловая и хиральная. УНТ (ОУНТ, МУНТ) могут иметь металлические или полупроводниковые свойства, связанные с направлением ориентации графитовых листов и диаметра трубки. Благодаря практически однородной структуре движение электронов в металлических УНТ происходит по длине трубки и возможно протекание электрического тока без выделения тепла. УНТ имеют высокие значения модуля Юнга и прочности на разрыв, например, отдельная ОУНТ имеет модуль Юнга около 37 ГПа [5]. ОУНТ и МУНТ могут быть синтезированы методами химического осаждения из паровой фазы (CVD), лазерной абляции углерода или угольно-дуговой разряд. Как правило, добиться однородности в структуре ОУНТ относительно сложнее по сравнению с МУНТ. Получение графена и изучение его электрических свойств позволило привлечь большое количество ученых для исследований физико-химических характеристик данного наноразмерного материала. Графен имеет относительную двумерную структуру (2D), т.к. данный моноуглеродный слой характеризуется конкретной толщиной, которую можно определить экспериментально. Структура графена характеризуется  $sp^2$ -связью, которая аналогична молекулярной структуре УНТ. Благодаря своей фактически бездефектной сетки  $sp^2$ -гибридизации графен обладает уникальными механическими, тепловыми и электрическими свойствами. Графен имеет чрезвычайно высокий модуль упругости - 1 ТПа и уникальную электро- и теплопроводность.

Целью данной работы являлось изучение структуры композиционных материалов на основе полиолефинов (ПО), модифицированных нанодисперсными графеноподобными частицами, получаемым по технологии СВС.

В качестве объектов исследований использовали полиэтилен низкого давления (ПЭНД) марки 277-03 (ГОСТ 16338-85), полиэтилен высокого давления (ПЭВД) марки 16207-020 (ГОСТ 16337-85). Полимеры модифицировали нанодисперсными графеноподобными частицами, получаемым по технологии СВС. Данный модификатор получают по технологии самораспространяющегося высокотемпературного синтеза из органического сырья в смеси со специальными горючими материалами и катализаторами. Размер первичных нанокристаллов находится в пределах 5-10 нм. Композиции готовили методом механического смешения порошков исходных ПО с наполнителем. Образцы для физико-

механических испытаний получали методом литья под давлением. Содержание наполнителя в композиции варьировали в пределах от 0,01 до 1 масс %.

Для определения структурных изменений в ПЭНД и ПЭВД при введении ультрадисперсных кластеров синтетического углеродного вещества исследовались рентгенограммы, полученные на рентгеновском дифрактомере общего назначения ДРОН-3.0. В дифрактометре использовали излучение линии  $K_{\alpha}$  от трубки с медным антикатодом, фильтрованное на длине волны- 154.050 пм. Степень кристалличности модифицированного полимера оценивали по формуле Руланда. Средний размер кристаллитов  $L$  оценивали по формуле Шеррера. Для более детального изучения структурных изменений в полиолефинах при введении нанодисперсных графеноподобных частиц строили корреляционные функции  $W(r)$ , связанные с функциями радиального распределения атомной плотности  $4\pi r^2\rho(r)$  условием, вытекающем из формулы Цернике-Принса. Изменения в структуре полимеров, происходящие при введении модификатора, изучали методами ИК-спектроскопии. Исследования проводили на приборе Tensor-27.

На рентгенограммах ПЭНД и ПЭВД, модифицированных ультрадисперсными кластерами синтетического углерода в области углов дифракции  $2\theta = 15-29^{\circ}$  (для ПЭНД) и  $2\theta = 11-32^{\circ}$  (для ПЭВД) наблюдается отчетливое гало с наложенными на него достаточно выраженным брэгговскими максимумами. В области углов  $2\theta=36-47^{\circ}$  (для ПЭНД) и  $2\theta=32-47^{\circ}$ (для ПЭВД) на рентгенограммах отмечено второе более размытое гало.

Проведенный расчет значений степени кристалличности показал, что введение модификатора не изменяет степени кристалличности модифицированных полимеров. Степень кристалличности не зависит от концентрации модификатора и остается постоянной и составляет  $\sim 94\%$ .

Однако модификатор оказывает влияние на средний размер кристаллитов полиэтилена. Введение 0,01 % модификатора в ПЭНД приводит к уменьшению размеров кристаллитов с  $358 \text{ \AA}$  до  $350 \text{ \AA}$  (таблица 1). Дальнейшее увеличение содержания ультрадисперсных кластеров синтетического углеродного вещества уменьшает средний размер кристаллов до  $308 \text{ \AA}$  (концентрация 0,5 %). Аналогичная зависимость размеров кристаллических агрегатов полиолефинов от концентраций нанодисперсных графеновых частиц характерно и для ПЭВД.

Таблица 1 – Зависимость средних размеров кристаллов полимера от концентрации модификатора

С, % полимер	0	0,01	0,03	0,05	0,1	0,3	0,5	1
$r_{\text{пэнд}}, \text{ \AA}$	358	350	347	330	321	311	308	323
$r_{\text{пэвд}}, \text{ \AA}$	186	181	172	165	159	162	170	174

Введение ультрадисперсных кластеров синтетического углеродного вещества приводит к существенным изменениям в аморфной части полимера (таблица 2). Для оценки изменений атомных координат были использованы от-

носительные координационные числа (ОКЧ) (число атомов в первой координационной сфере исходного полиэтилена принято за 100 %), т.е. ОКЧ соответствующей координационной сферы – это процентное отношение числа атомов в ней к числу атомов в сфере радиусом, равным радиусу первой координационной сферы исходного полиэтилена (таблица 2).

Таблица 2 – Зависимость относительного координационного числа  $\Delta S$  от процентного содержания ультрадисперсных кластеров синтетического углерода в полиэтилене

С, %		0	0,01	0,03	0,05	0,1	0,3	0,5	1
ПЭВД	$\Delta S$	1	1,15	1,17	1,21	1,23	1,24	1,23	1,22
	r, Å	2,28	2,4	2,3	2,1	1,8	1,7	1,3	1,4
ПЭНД	$\Delta S$	1	1,268	1,134	1,09	1,089	1,245	0,935	1,14
	r, Å	2,3	2,4	2,4A	2,5	2,7	2,8	2,8	2,9

Из таблицы 2 видно, что введение модификатора приводит к увеличению значения ОКЧ до 1,24 (для ПЭВД) и 2,9 (для ПЭНД) соответственно. По-видимому, это связано с появлением в аморфной матрице полимера областей молекулярного упорядочения. Необходимо отметить, что введение модификатора приводит к изменению радиуса координационной сферы, который соответствует длине связи С-С.

Определение оптической плотности полосы поглощения лежащей, в области  $1378 \text{ см}^{-1}$  и соответствующей поглощению метильных групп, показало, что введение нанодисперсных графеноподобных частиц приводит к увеличению значений ее оптической плотности. Полоса поглощения, лежащая в области  $720\text{-}730 \text{ см}^{-1}$ , соответствует маятниковым колебаниям групп  $-\text{CH}_2-$  и зависит от степени упорядочения полимера. Введение модификатора приводит к увеличению значений оптической плотности данной полосы поглощения (таблица 3).

Таблица 3 – Зависимость оптической плотности полос поглощения от концентрации модификатора в ПЭВД

С, %	0	0,01	0,03	0,1	0,3	0,5	1,0
$D_{720, \nu} \text{ см}^{-1}$	0,65	0,78	0,82	0,83	0,85	0,86	0,86
$D_{1378, \nu} \text{ см}^{-1}$	0,17	0,23	0,24	0,24	0,25	0,26	0,25

Таким образом, исходя из структурных исследований, можно констатировать, что введение ультрадисперсных кластеров синтетического углерода приводит к структурным изменениям в аморфной части полиэтилена, происходит образование областей локального упорядочения. Изменений степени кристалличности полимеров при модифицировании не происходит, однако отмечается изменение размеров кристаллических образований. Увеличение оптической плотности полосы поглощения лежащей при  $1378 \text{ см}^{-1}$ , по-видимому, свидетельствует о формировании физической сетки лабильных связей в аморфной части полимера при введении модификатора.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Potts J.R. [et al.] Graphene-based polymer nanocomposites. // *Polymer*. – 2011. – Vol. 52. – pp. 5–25.
2. Лиопо В. А. [и др.] Влияние выбора ячейки в кристалле на ячейку обратной решетки // *Веснік Брэсцкага дзяржаўнага ўніверсітэта імя А. С. Пушкіна. Серыя 4. Фізіка. Матэматыка*. – 2019. – № 2. – С. 12–23.
3. Parageorgiou D.G., Kinloch I.A., Young R.J. Graphene/elastomer nanocomposites. // *Carbon*. – 2015. – Vol. 95. – pp. 460–484.
4. Овчинников Е. В. [и др.]. Противоречия в структуре алмаза и их устранение // *Горная механика и машиностроение*. – 2018. – № 4. – С. 66–77.
5. Young R.J. [et al.] The mechanics of graphene nanocomposites: a review. // *Comp Sci Tech*. – 2012. – Vol. 72. – pp. 1459–1476.

**УДК 621.62.762**

## **ИССЛЕДОВАНИЕ СКОРОСТИ ИЗНАШИВАНИЯ КОНТАКТНЫХ КОЛЕЦ ТОРЦОВЫХ УПЛОТНЕНИЙ С ИЗНОСОСТОЙКОЙ РАБОЧЕЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ**

**Голуб В.М.<sup>1</sup>, Теслюк Д.В.<sup>2</sup>, Колодич В.В.<sup>3</sup>, Добрияник Ю.А.<sup>4</sup>,  
Мартынов А.В.<sup>5</sup>**

- 1, 2) Брестский государственный технический университет,  
г. Брест, Республика Беларусь  
3,4,5) ОАО «ЦВЕТОТРОН» г. Брест, Республика Беларусь

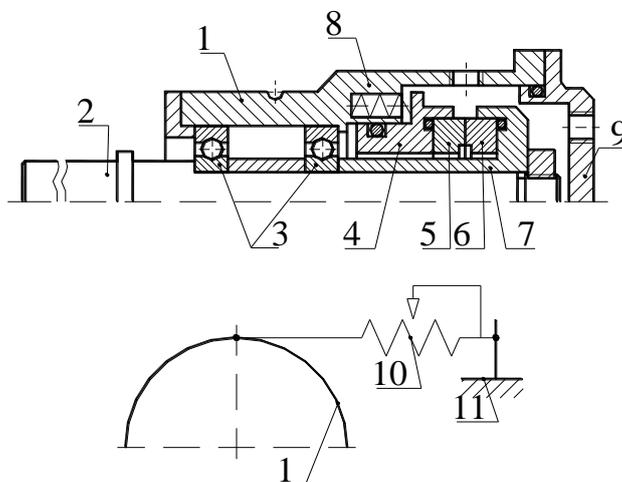
Подбор материалов фрикционной пары и ее способность работать длительный период времени в режиме сухого трения или дефицита смазки, является важной задачей машиностроения. Фрикционный узел в процессе работы при высоких скоростях скольжения воспринимает как статические, так и динамические нагрузки и подвергается изнашиванию. На работу фрикционного узла влияет температурный режим, окружающая среда и наличие в ней абразива. Способность материалов поглощать или рассеивать тепловую энергию без катастрофического износа является важной характеристикой фрикционной пары.

Антифрикционные материалы должны сопротивляться терморастрескиванию в режиме сухого трения. На поверхности трения не должно возникать трещин в результате многократного колебания силового и теплового воздействия. В рабочих средах в условиях плохой смазки в узлах антифрикционной пары трения нашли применение композиционные материалы и покрытия на основе карбида вольфрама и медьсодержащей матрицы.

Для решения прикладных задач триботехники, связанных с оптимизацией состава композиционных материалов, применительно к антифрикционным

устройствам, способным работать в сухом режиме трения и при дефиците смазки, проведены их испытания.

Разработан специальный стенд, позволяющий снимать триботехнические характеристики материалов пар трения. Основным узлом стенда является испытательная головка.



**Рисунок 1 – Схема стенда для испытания контактных колец на трение и износ**

Испытательная головка содержит корпус 1 и шпиндель 2. Вал шпинделя закреплен на подшипниках 3 в корпусе 1. В камере испытательной головки установлена аксиально-подвижная втулка 4 с контактным кольцом 5. Вращающееся контактное кольцо 6 установлено в обойму 7, связанную с валом. Аксиально-подвижная втулка с контактным кольцом 5 поджата пружинами 8, равномерно расположенными по окружности, к контактному кольцу 6. Усилие нагружения контакта определяется по величине сжатия пружин. Испытательная камера закрывается крышкой 9. Изменение частоты вращения шпинделя осуществляется через коробку передач станка, например, токарного, на котором устанавливается испытательная головка. Момент силы трения измеряется динамометром 10, прикрепленным к корпусу 1 головки тросиком через неподвижную стойку 11.

Износостойкий слой наносится на рабочие поверхности стальных колец путем припекания разнородных порошков карбида вольфрама медьсодержащей связкой. Для этого применяют методы порошковой металлургии, газопламенного напыления, электродугового расплава под слоем флюса, индукционного и электроконтактного припекания.

В качестве шихты использованы смеси тонкодисперсных порошков карбида вольфрама с кобальтом (ВК-6, ВК-8 и др.) и литой карбид вольфрама (релит) с зернистостью 0,05 – 0,1 мм.

После припекания износостойкого слоя проводится окончательная механическая обработка контактного кольца, при которой рабочая поверхность шлифуется и притирается алмазными пастами для достижения шероховатости  $Ra \leq 0,16 - 0,3$  мкм и отклонением от плоскости 0,9 – 0,6 мкм.

Испытанию были подвергнуты контактные пары, на торцевой поверхности колец которых нанесены износостойкие слои путем припекания разнозернистых порошков карбида вольфрама и медьсодержащей связки при температуре ее плавления. В качестве матричной связки для колец первой пары трения принята медь, для колец второй пары – медно-никелевый сплав, с содержанием никеля 10% и для колец третьей пары медно-никелевый сплав с содержанием никеля 30%.

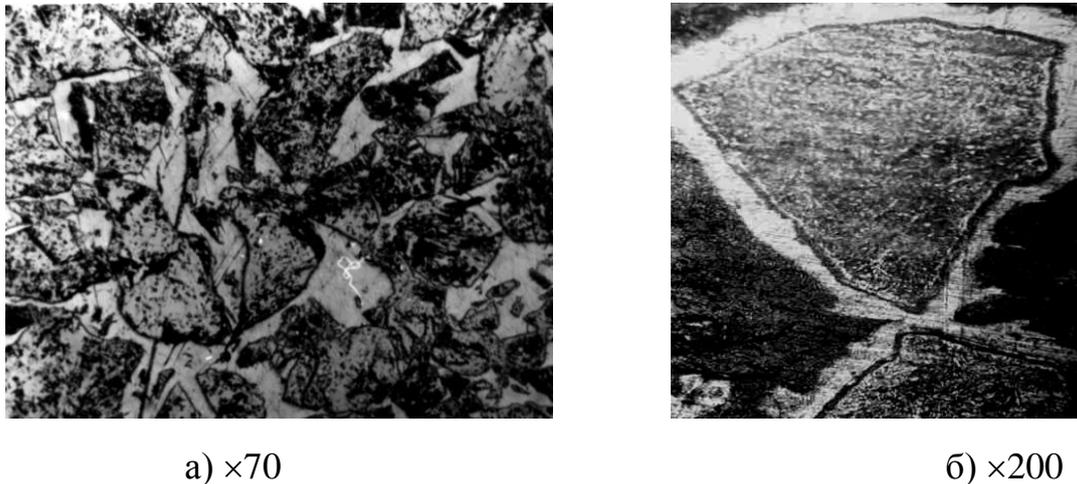


Рисунок 2 – Микрофотография поверхности и структура композиционного материала до испытания

Перед испытаниями были сняты профилограммы рабочих поверхностей, шероховатость которых составила  $Ra=0,21$  мкм (рис. 3).

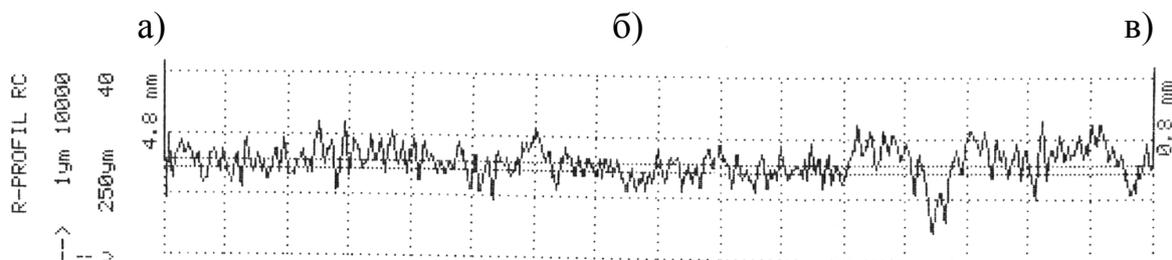
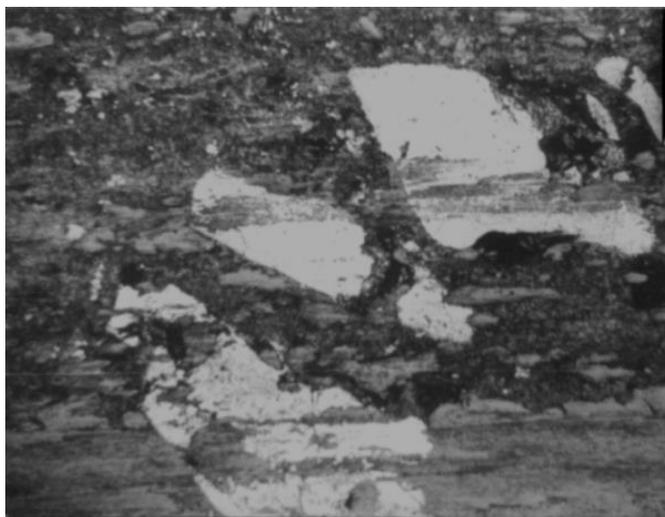


Рисунок 3 – Результаты профилографирования контактных поверхностей пар трения

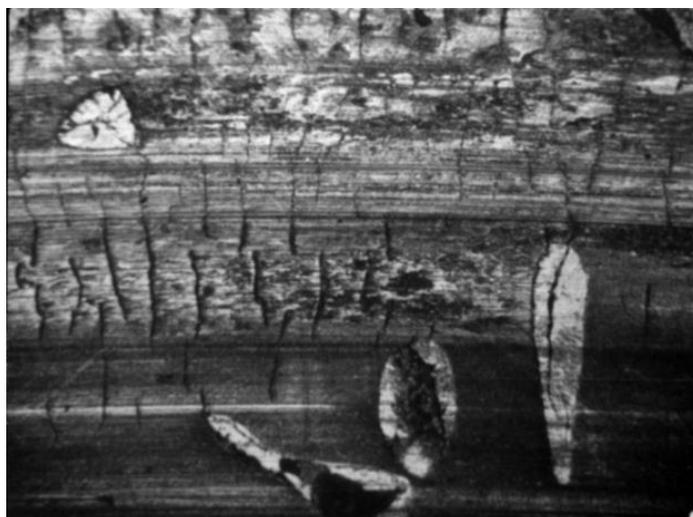
Испытания без смазки проводились при скорости скольжения 7 м/с и удельном нагружении контакта  $p_{уд} = 0,3$  МПа. Испытания пар трения проводились в течение 10 часов с периодическими пусками и остановами. Коэффициент трения контактных колец составил 0,2–0,3. Температура колец достигала 400 °С. Шероховатость поверхностей после испытания увеличилась и составила для колец первой и второй пары трения  $Ra = 1,55$  мкм, а для третьей пары трения –  $Ra = 2,13$  мкм.

Поверхности колец первой и второй пары трения не претерпели особых изменений (рисунок 4). На рабочих поверхностях колец третьей пары, с повышенным содержанием никеля в матричной связке, отмечены микротрещины

(рисунок 5). Более высокой стойкостью в режиме сухого трения обладают контактные кольца, рабочий слой которых выполнен на основе медной и медно-никелевой связки с небольшим содержанием никеля. Увеличение никеля в матрице снижает теплоотвод от поверхности контактных колец и при многоцикло-вой микропластической деформации материала связки, с изменением температуры, приводит к возникновению микротрещин.



**Рисунок 4 – Контактная поверхность кольца с рабочим слоем на основе зернового карбида вольфрама и медьсодержащей матричной связки  
Cu – 100% (×200) после испытаний**

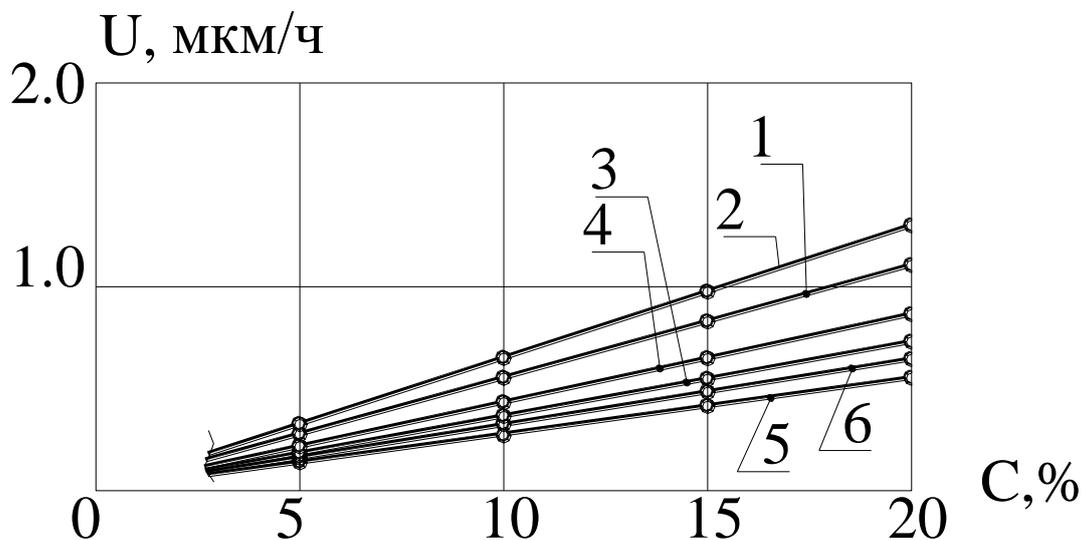


**Рисунок 5 – Контактная поверхность кольца с рабочим слоем на основе зернового карбида вольфрама и медно-никелевой матричной связки  
Cu – 70%; Ni – 30% (×200) после испытаний**

Были проведены исследования контактных колец пар трения в условиях абразивного воздействия.

В этом случае пары трения испытывались при подводе к контакту абразивной смеси (вода с тонкозернистым 0,05 – 0,065 мм кварцевым песком).

Получена зависимость скорости изнашивания контактных колец от концентрации абразива в гидроабразивной смеси. С увеличением содержания абразива скорость изнашивания рабочего слоя возрастает (рисунок 6).



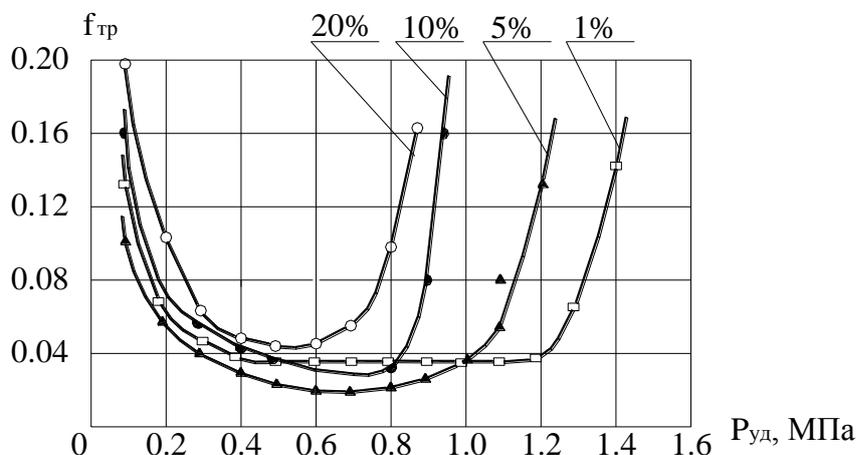
**Рисунок 6 – Зависимость скорости изнашивания контактных колец от процентного содержания абразива в рабочей среде (вода), при  $p_{уд}=0,3$  МПа,  $v=15$  м/с:**

1 и 2 – неподвижное и вращающееся контактные кольца первой пары трения;  
 3 и 4 – неподвижное и вращающееся контактные кольца второй пары трения;  
 5 и 6 – неподвижное и вращающееся контактные кольца третьей пары трения.

В общем виде эта зависимость описывается уравнением:

$$u = k \cdot c^m$$

где  $u$  – скорость изнашивания, мкм/ч;  $c$  – концентрация абразива, %;  $k$  и  $m$  – коэффициенты, определяющие износные характеристики материалов контактных колец. В случае абразивного износа  $m = 1$ , а коэффициент  $k$  определяется тангенсом угла наклона кривой и для первой пары трения  $k^1 = 0,3$ ; второй –  $k^2 = 0,2$ ; третьей –  $k^3 = 0,15$ .



**Рисунок 7 – Зависимость коэффициента трения от удельного нагружения контактной пары трения и содержания абразивных частиц в гидросмеси**

Существенно изменяется и нагрузочная способность колец пары трения от концентрации абразива. Так, если контактная пара трения работает в воде с содержанием абразива до 1%, то ее нагрузочная способность достигает  $p_{уд}=1,2$  МПа (рисунок 7). С повышением концентрации абразива нагрузочная способность пары трения снижается. Наличие абразива в жидкости до 10% снижает допустимую нагрузку на контакт почти в два раза. Диапазон допустимой нагрузки определяется относительной стабильностью наименьшей величины коэффициента трения. Скачкообразное увеличение коэффициента трения сопровождается схватыванием материала контактных поверхностей и интенсивным износом колец пар трения.

УДК 621.785.5

## **КОМПЛЕКСНАЯ ОБРАБОТКА КОРРОЗИОННОСТОЙКИХ СТАЛЕЙ ДЛЯ ПОВЕРХНОСТНОГО УПРОЧНЕНИЯ МЕДИЦИНСКИХ ИЗДЕЛИЙ**

**В. С. Капленко, С. И. Багаев, И. Л. Поболь**

Физико-технический институт НАН Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь

### **Введение.**

В медицинской отрасли используется большая номенклатура инструментов, изделий и приспособлений, для изготовления которых применяются высоколегированные стали аустенитного класса (AISI 347, AISI 316L, AISI 304, 12X18H10T и др.). Эти стали хорошо ведут себя в среде биологических жидкостей и тканей [1].

В зависимости от назначения к инструментам и изделиям, имплантируемым в биологическую ткань, предъявляются различные прочностные требования. Например, использование спицы Киршнера, изготавливаемой из проволоки, затруднено при ее введении в биологическую ткань ввиду высокой пластичности и низкой упругости материала импланта. Режущая кромка спицы при вводе быстро тупится из-за низкой твердости материала. Решение этой проблемы возможно с применением методов инженерии поверхности.

Возрастающие требования к качеству инструментов и изделий делают необходимым применение современных технологий обработки, направленных на повышение качества поверхности и прочностных свойств материалов. Ионно-плазменное азотирование (ИПА) является современным высокоэффективным технологическим процессом упрочнения поверхности различных сталей, включая высокохромистые материалы [2]. В соответствии с исследованиями авторов [3], низкотемпературное ИПА (350–400 °С) позволяет формировать плотные упрочнённые слои на поверхности стали AISI 304.

Известно, что ИПА может снизить коррозионную стойкость поверхности стали аустенитного класса [3]. Причина этого заключается в распылении тлеющим разрядом частиц со стен камеры, оснастки и других азотируемых элементов и осаждении их на обрабатываемую поверхность. ИПА, особенно при вы-

соких температурах, имеет тенденцию отрицательно влиять на антикоррозионные свойства нержавеющей стали из-за образования нитрида хрома CrN, который выводит хром из твердого раствора или из-за образования на поверхности нитридов железа.

В работе выполнено исследование возможности очистки поверхности и восстановления антикоррозионных свойств материала с использованием метода электролитно-плазменной полировки (ЭПП).

### **Материалы, оборудование, методики исследований**

Объектом исследования является заготовка спицы Киршнера длиной 300 мм и диаметром 2 мм из стали AISI 347 (таблица 1). Они широко используются в ортопедии и других видах медицинской и ветеринарной хирургии.

Таблица 1 – Химический состав в стали AISI 347, мас. %

C	Cr	Ni	Mn	Si	P	S	Fe
< 0,08	17,0–19,0	9,0–13,0	< 2,0	< 1,0	< 0,045	< 0,03	остальное

Спицы относятся к погружным металлоконструкциям в травматологии. К качеству их поверхности предъявляют жесткие требования. Параметр шероховатости таких изделий не должен превышать Ra 0,63 мкм [4].

В качестве образцов-свидетелей использовались фрагменты спицы длиной 30 мм для изучения всех этапов комплексной обработки.

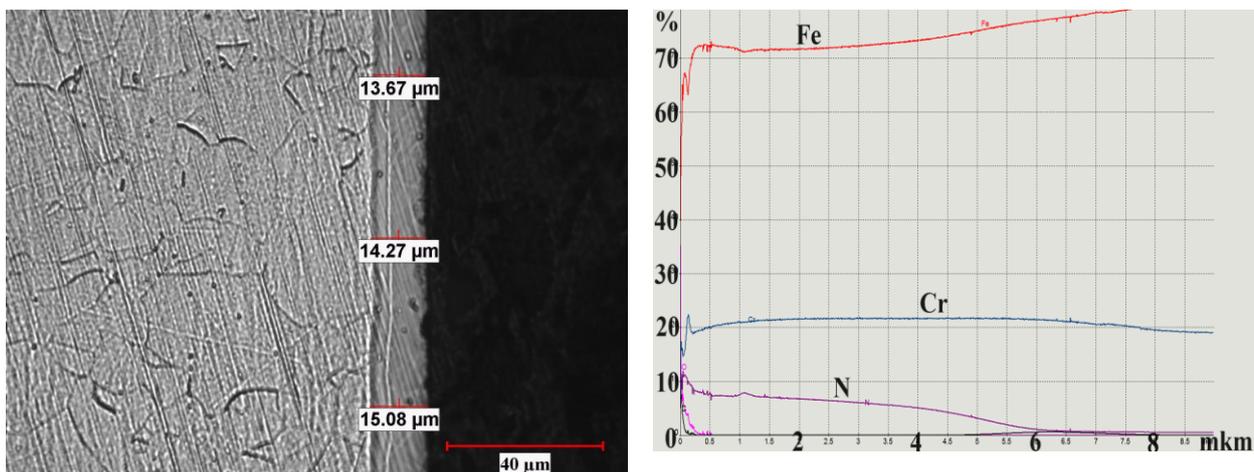
Элементный анализ проводили на оптическом эмиссионном спектрометре тлеющего разряда Horiba Profiler 2 (Франция). Шероховатость поверхности определяли с помощью профилометра Mitutoyo SurfTest SV-2100 (Япония). Исследования электрохимических свойств поверхности проводили на потенциостате/гальваностате Multi Autolab/M204 (Нидерланды) методом линейной поляризации в 10 %-ном растворе NaCl комнатной температуры в трёхэлектродной ячейке с электродом сравнения Ag/AgCl/KCl и вспомогательным платиновым электродом.

Из обработанных образцов-свидетелей изготовлены поперечные шлифы. Металлографические исследования микроструктуры выполняли на оптическом микроскопе МИ-1, микродюрметрические – на микротвердомере AFFRI-MVDM8 с нагрузкой на индентор 100 г. Процесс ЭПП образцов проводили на установке ЭИП-100 производства ФТИ НАН Беларуси при постоянном напряжении 320 В и температуре электролита 85 °С в течение 30, 45 и 60 с. В качестве электролита использовали 5 %-ный раствор сульфата аммония.

Травление поверхности шлифов проводили реактивом Марбле – сульфат меди CuSO<sub>4</sub> (20 г), соляная кислота HCl (100 мл), дистиллированная вода (100 мл).

### **Экспериментальные исследования**

ИПА проводили в установке колпакового типа с «холодными стенками» производства ФТИ НАН Беларуси. Учитывая имеющийся опыт азотирования высокохромистых сталей, был выбран оптимальный режим обработки [2]. Температура азотирования образцов-свидетелей из стали AISI 347 составляла 400 °С, время выдержки 16 ч. В качестве рабочей среды использована смесь газов N<sub>2</sub>+H<sub>2</sub>+Ar.



№ 1

**Рисунок 1 – Микроструктура и результаты элементного анализа по глубине образца-свидетеля № 1 из стали AISI 347 после ИПА**

Поверхностный слой образцов после проведения ИПА состоит из нитридного слоя, состоящего из смеси нитридов  $Fe_{2-4}N$  и  $Cr_{1-2}N$  (рисунок 1). Под нитридным слоем располагается тонкая гетерофазная зона, состоящая из азотистого аустенита ( $\gamma$ -фаза) с включениями нитрида  $Cr_{1-2}N$ . В аустените выделения частиц нитридов практически отсутствуют, что способствует сохранению достаточного запаса пластичности слоя.

После ИПА образцов-свидетелей поверхность теряет яркий металлический блеск и приобретает серый цвет. Шероховатость повышается с Ra 0,05 мкм до Ra 0,15 мкм (таблица 2).

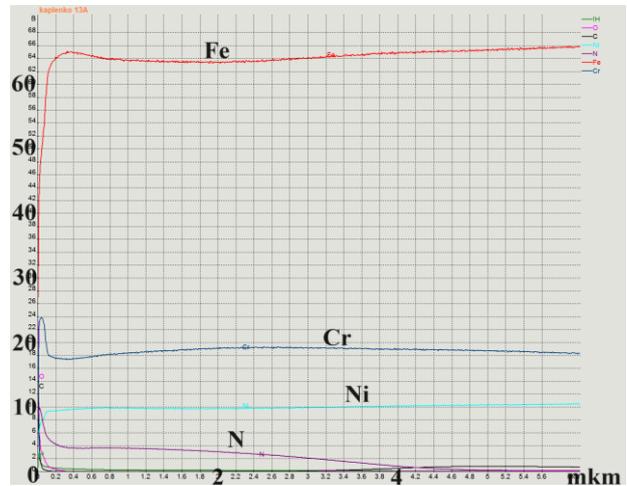
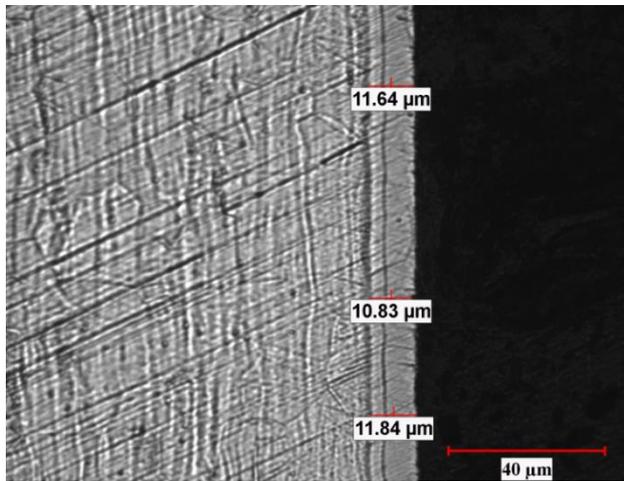
**Таблица 2 – Характеристики азотированного слоя образцов из стали AISI 347**

Состояние поверхности	№ образца	Средняя микротвёрдость поверхности HV	Средняя глубина слоя, мкм	Глубина проникновения азота, мкм	Годовая коррозия, мм/год	Средняя шероховатость поверхности Ra, мкм
После ИПА	1	950	14,3	~ 7,0	0,002	0,15
После ИПА+ЭПП	2	810	11,4	~ 4,3	0,0015	0,10
	3	770	11,1	~ 5,2	0,0009	0,07
	4	680	9,6	~ 4,1	0,0006	0,05
Исходное	5	320	–	–	0,0006	0,05

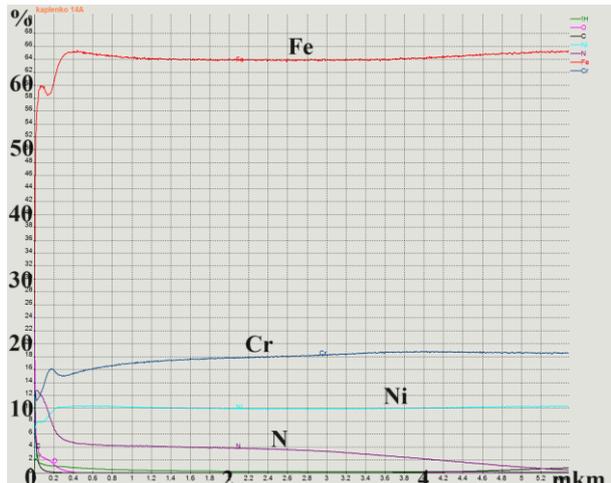
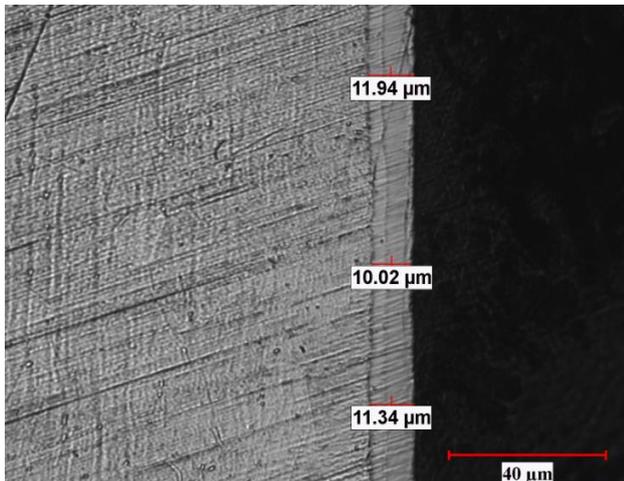
При ИПА происходит распыление поверхности, интенсивность которого зависит от величины плотности тока и катодного падения потенциала. Детали являются катодом, а стенки камеры – анодом. Между катодом и анодом возбуждается тлеющий разряд, и ионы газа, бомбардируя поверхность катода, нагревают её до температуры азотирования. В процессе ИПА на обрабатываемую поверхность осаждаются слой частиц, распыленных тлеющим разрядом со стен камеры, осадки и других азотируемых деталей.

Следующий этап комплексной обработки заключался в проведении ЭПП, который является высокопроизводительным методом снижения шероховатости поверхности металлов и сплавов. Поверхностный слой образцов после прове-

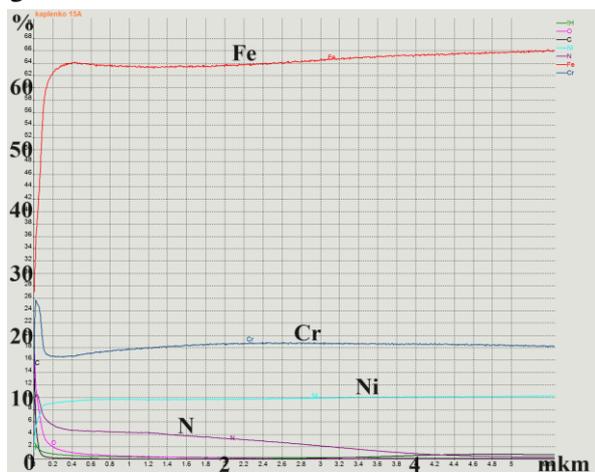
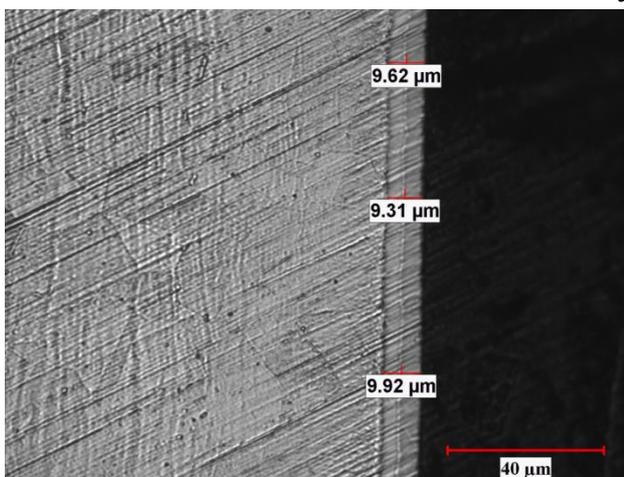
дения двух процессов обработки состоит из нитридного слоя, состоящего из смеси нитридов  $Fe_{2-4}N$  и  $Cr_{1-2}N$  (рисунок 2). Под нитридным слоем располагается тонкая гетерофазная зона, состоящая из азотистого аустенита ( $\gamma$ -фаза) с включениями нитрида  $Cr_{1-2}N$ .



№ 2



№ 3

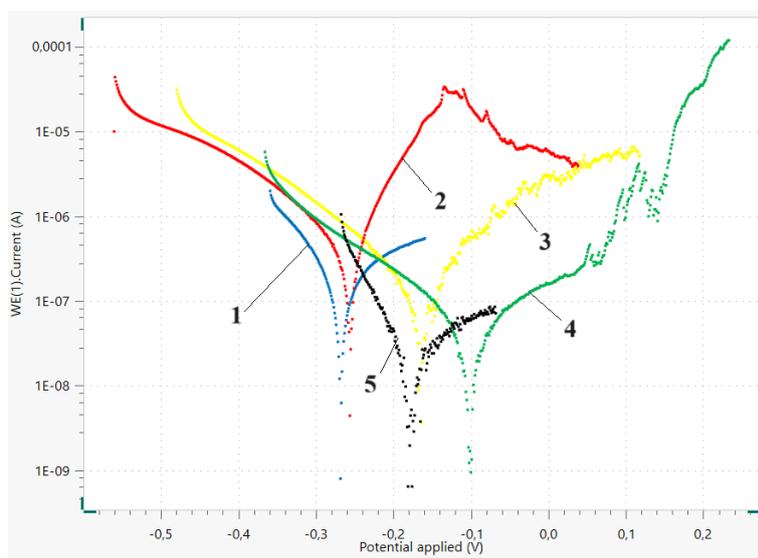


№ 4

Рисунок 2 – Микроструктура и результаты элементного анализа по глубине азотированных образцов-свидетелей № 2–4 из стали AISI 347 после ЭПП

При увеличении времени ЭПП средние значения глубины и микротвёрдости материала поверхностного слоя уменьшаются, глубина проникновения азота слоя снижается (таблица 2). Установлено, что скорость съема материала составила около 5 мкм/мин. Спицам и образцам-свидетелям после ЭПП возвращается яркий металлический блеск.

Коррозионные испытания проводили методом линейной поляризации (рисунок 3). Значения годовой коррозии поверхности образцов № 1–5 определяли с помощью программы Nova. При исследовании образцов снимали катодные и анодные кривые. ЭПП позволяет восстанавливать коррозионную стойкость поверхности после ИПА до уровня исходного состояния поверхности (рисунок 3 и таблица 2). Микротвёрдость и глубина упрочнённого слоя снижается, но остается в пределах, необходимых для эксплуатации спиц. Шероховатость поверхности азотированных образцов после процесса ЭПП в течение 60 с снижается до состояния исходного значения поверхности. Происходит удаление микровыступов, что влечет за собой сглаживание и повышение зеркальности поверхности. Вместе с микровыступами удаляются инородные включения и различные загрязнения, происходит обезжиривание поверхности [4].



**Рисунок 3 – Зависимость силы тока от потенциала коррозии образцов из стали AISI 347, подвергнутых ИПА (1); ИПА+ЭПП в течение 30 с (2), 45 с (3) и 60 с (4); в исходном состоянии (кривая 5)**

### **Заключение**

Проведены комплексные исследования комбинированной обработки по упрочнению поверхности и сохранению коррозионной стойкости стали AISI 347.

Метод ионно-плазменного азотирования позволяет формировать равномерные плотные упрочнённые слои на поверхности стали с образованием нитридов хрома.

Применение метода электролитно-плазменной полировки упрощает процесс финишной обработки поверхности спиц, сохраняет азотированный слой с микротвёрдостью HV 680, приводит к удалению дефектного слоя с поверхности и восстановлению коррозионной стойкости материала.

Проведенные исследования позволяют разработать комбинированный метод упрочнения медицинских изделий.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Новые технологии обработки материала на восстановление опорно-двигательных функций человека / Ю. Г. Алексеев [и др.] / Литье и металлургия. 2008. – Том 2, № 38. – С. 196–197.
2. Effect of ion-plasma nitriding and electrolyte-plasma polishing on the hardness and corrosion resistance of high-chrome steels/ V.S. Kaplenko [at al.] // Plasma physics and plasma technology : X International conference, Minsk, 12–16 Sept. 2022 : contributed papers. – Minsk, 2022. – P. 342–345.
3. Ogorek, M. Ion nitriding using the active screen method. / M. Ogorek, M., T. Freчек. // Metallurgy. – 2019. – Vol. 3–4, P. 243–246.
4. Алексеев, Ю. Г. Комплексная технология изготовления изделий медицинской техники, основанная на пластическом деформировании и физико-технических методах / Ю. Г. Алексеев, В. Н. Страх, А. Ю. Королев / Литье и металлургия. 2005. – Том 4. № 36. – С. 180–187.

УДК 621.793:66.088

### **МОРФОЛОГИЯ ПОКРЫТИЙ, ФОРМИРУЕМЫХ БЕСКОНТАКТНЫМ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОИСКРОВОГО РАЗРЯДА ИЗ ТУГОПЛАВКИХ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ**

**Костюкович Г.А.<sup>1</sup>, Хвисевич В.М.<sup>2</sup>, Овчинников Е.В.<sup>1</sup>, Михайлов В.В.<sup>3</sup>, Веремейчик А.И.<sup>2</sup>, Эйсымонт Е.И.<sup>1</sup>, Пинчук Т.И.<sup>4</sup>**

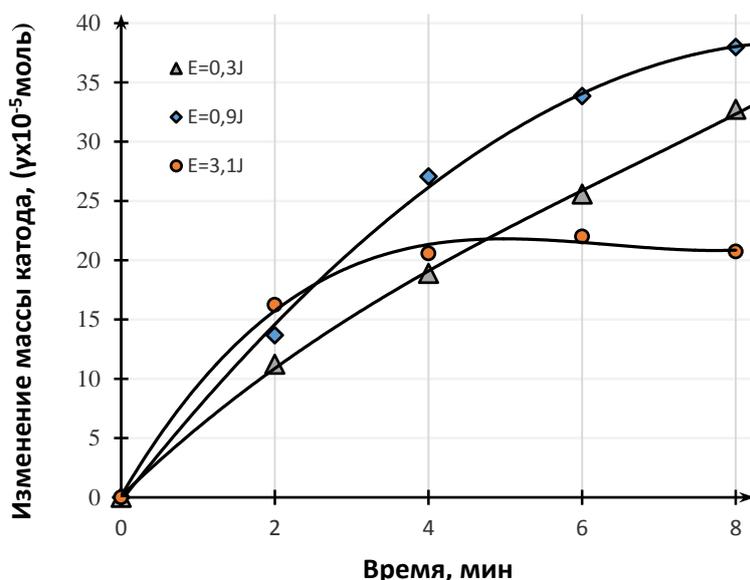
- 1) Гродненский государственный университет им. Янки Купалы, г. Гродно, Республика Беларусь
- 2) Брестский государственный технический университет, г. Брест, Республика Беларусь
- 3) Институт прикладной физики Академии наук Молдовы, г. Кишинев, Молдова
- 4) Институт порошковой металлургии имени академика О.В. Романа, г. Минск, Республика Беларусь

Увеличение эксплуатационного ресурса деталей машин и механизмов достигается путем совершенствования структуры материала, а также модифицированием поверхностных слоев изделий различных конструкций. Одним из широко применяемых методов модифицирования поверхности различных проводящих материалов является метод электроискрового легирования металлов [1–5]. Электроискровое легирование (ЭИЛ) твердых проводящих поверхностей заключается в том, что в результате прохождения между электродами происходит направленный выброс материала электродов. В процессе электроискрового разряда разрушается преимущественно анод. Так как ЭИЛ проводится в газовой среде, то это приводит к тому, что при заданных условиях материал анода,

находящийся в основном в газовой или жидкой фазах, наносится на катод. В результате взаимодействия наносимого материала с материалом катода и окружающей средой на катоде формируется слой с определенными физико-механическими характеристиками. Этот слой имеет сложный химический состав и структуру и обычно содержит не только материал анода, но и твердые растворы, химические соединения, различные сплавы и псевдосплавы. Формирование электроискровых покрытий приводит к существенному изменению механических, электрических, термических, магнитных, термоэмиссионных свойств модифицируемых поверхностных слоев твердых тел. Достоинством электроискрового легирования является: высокая адгезионная прочность покрытия к субстрату; возможность получения покрытий из тугоплавких материалов без разогрева материала основы; поверхности, на которых формируются покрытия ЭИЛ, не требуют никакой предварительной подготовки; простота, надежность и транспонтабельность технологического оборудования. Однако методу электроискрового легирования присущи и недостатки: ограниченный круг наносимых материалов, т.е. невозможность использования материалов с высоким удельным сопротивлением ( $\rho > 10^{-2}$ - $10$  Ом см), диэлектриков; трудности нанесения некоторых материалов на определенные типы подложек (в частности на алюминий и его сплавы, титан и т.п.); сравнительно невысокая производительность процесса; ограниченность по толщине формируемого покрытия.

Предлагаемый подход позволил значительно расширить круг применяемых материалов (металлы, полупроводники, диэлектрики). Возможно предположить следующий процесс формирования покрытий по данному методологическому подходу: частицы порошка попадая в межэлектродный рабочий зазор, вызывают возрастание напряженности электрического поля до величины большей, чем диэлектрическая прочность промежутка, в результате чего происходит инициирование разряда емкости искрового генератора. Под действием энергии, выделяемой в канале искрового разряда, твердая частица порошка в зависимости от параметров разряда, массы самой частицы и ее теплофизических свойств частично или полностью переходит в жидкую или парообразную фазы и наносится на обрабатываемую поверхность. Вследствие закорачивания канала разряда искрового промежутка, напряжение постоянного электрического поля падает почти до нуля, а за тем после деионизации искрового промежутка принимает прежнее значение, т.е. в определенном объеме происходит импульсное изменение электрического поля. Последующее попадание частицы в зону канала разряда вновь вызывает низковольтный сильноточный импульс. Следует отметить, что попадание даже одной частицы в межэлектродный зазор, при достаточной величине напряженности наложенного на промежуток электрического поля, приводит к инициированию сильноточного разряда, что дает возможность избирательного воздействия на отдельную частицу высокими температурами и ударными волнами, возникающими при искровом разряде. Высоковольтный поджиг рабочего промежутка, происходящий при попадании частиц порошка в межэлектродный зазор, способствует выделению в канале разряда более высокой мгновенной тепловой мощности по сравнению с разрядом без поджига. Таким образом данный технологический подход является достаточно перспективным для формирования электроискровых покрытий.

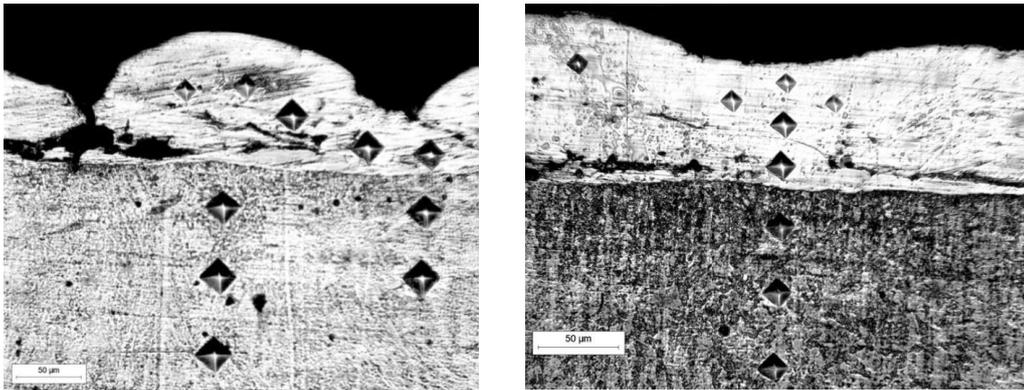
Для определения оптимального режима, при котором максимальное количество порошка могло попасть в зону действия разряда, частота вибрации обрабатываемого электрода медленно варьировалась от 100 до 30 Гц. В качестве источников импульсных разрядов использовались как промышленные, так и экспериментальные установки. Процесс ЭИЛ проводили в диапазоне значений энергии разряда от 0,3 до 10,0 Дж. В ходе проведенных исследований было изучено изменение массы катода модифицируемого материала при нанесении покрытий из порошка карбида вольфрама (рисунок 1).



**Рисунок 1 – Влияние энергии электрических импульсных разрядов на формирование покрытия на поверхности катода из углеродистой стали С45 в ЭИЛ с компактным электродом из W и порошком WC**

Как видно из рисунка 1, при всех значениях энергии разряда на катоде осаждалось практически одинаковое количество материала, что не укладывается в известное соотношение  $\gamma=f(E)$ , в котором установлено, что массоперенос анода на поверхность катода прямо пропорционален величине энергии импульсного разряда. На наш взгляд, этот результат может иметь два объяснения. Введение порошка карбида вольфрама в зазор в процессе ЭИЛ существенно меняет механизм формирования упрочненного слоя на катоде. Анод больше не играет основной роли подачи эродированного материала на поверхность катода. Эта роль в основном принадлежит порошковому материалу. Введение порошка карбида вольфрама в зазор приводит к существенной модификации механизма образования покрытия и свидетельствует о том, что установленные ранее критерии (по толщине, скорости осаждения и т.п.) справедливы только для случая компактного анода.

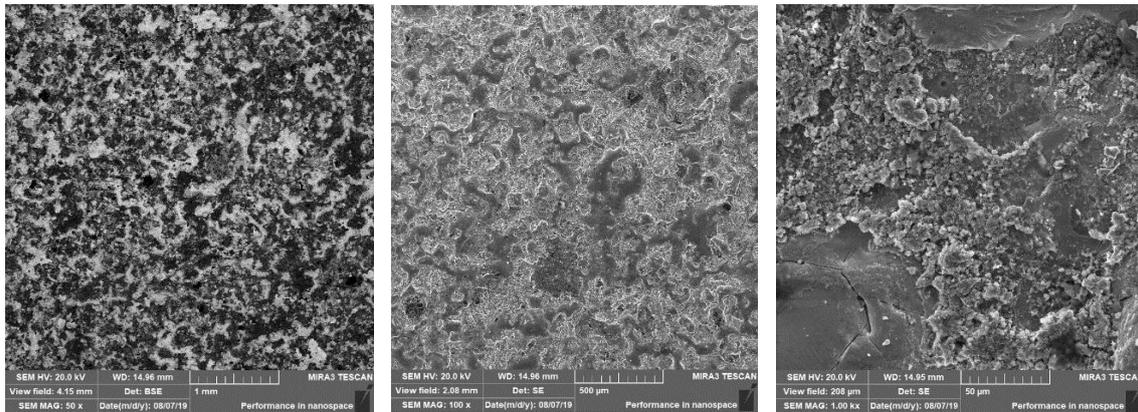
Интерес представляют исследования многокомпонентных соединений сверхтвердых материалов. На рисунке 2 представлены микрошлифы с покрытием TiAlC. Данный класс покрытий получен при последовательной обработке стали С45 титановыми, алюминиевыми и графитовыми электродами в режиме колебаний электродов и изменении значения энергии разряда в пределах (0,3÷3,0) Дж.



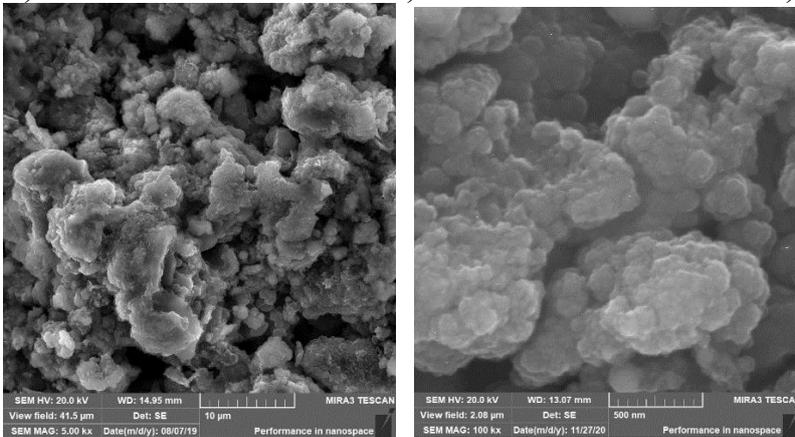
а) б)

**Рисунок 2 – Микроструктура образцов С45 с покрытиями TiAlC, полученная при последовательной обработке Ti, Al и графитовыми электродами в режиме вибрации электрода (а) и вращения проволочных электродов в плоскости, перпендикулярной поверхности катода (б)**

Анализ шлифов с покрытиями показал, что, независимо от величины электрических импульсов, которыми проводилась обработка, сформированные слои отличаются сплошностью и малой однородностью (рисунок 2, а), в то время как при обработке в одном и том же энергетическом режиме аппликатором в форме «шелковицы», получены равномерные покрытия по толщине и высокой сплошности (рисунок 2, б).



а) б) в)



г) д)

**Рисунок 3 – Морфология покрытий TiAlC, полученных при различных разрешениях растровой электронной микроскопии**

Методом растровой электронной микроскопии изучена морфология покрытий TiAlC, формируемых по предлагаемой технологии (рисунок 3).

Согласно полученных данных формируется покрытие с морфологией на подобие «шагреновой кожи». По сравнению с покрытиями, получаемыми по стандартной технологии электроискрового легирования, в формируемых покрытиях наблюдается меньшее количество дефектов, пор. В исследуемых покрытиях формируются структуры нанометрового размера, что может свидетельствовать о процессах наноструктурирования в покрытиях, получаемых методом совмещения в межэлектродном промежутке низковольтных сильноточные импульсов и налагаемого сильного электрического поля (рисунок 3, д).

*Работа выполнена в рамках проекта T22МЛДГ-004.*

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 Овчинников, Е. В. Технология синтеза наноструктур при электроискровом легировании / Е. В. Овчинников, В. В. Михайлов, Н. М. Чекан // Актуальные проблемы прочности: монография; под редакцией В. В. Рубаника. – Молодечно, 2020. – С. 345–358.

2 Михайлов, В. В. Наноконпозиционные покрытия, формируемые методом ЭИЛ / В. В. Михайлов, Е. В. Овчинников / Инновационные технологии машиностроения в транспортном комплексе: материалы XI Международной научно-технической конференции ассоциации технологов-машиностроителей. – Калининград: «Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта», 2020.– С. 186–195.

3 Физико-механические характеристики наноконпозиционных покрытий, формируемых методом электроискрового легирования / В. В. Михайлов [и др.] // Веснік ГрДУ імя Янкі Купалы. Сер. Сер 6, Тэхніка. – 2019. – Т.9. – № 2. – С.45–53.

4 Zamulaeva, E.I., Levasov, E.A., Kudreasov, A.E., Vacaev, P.V., Petrzhik, M.I. Electrospark coatings deposited onto an Armco iron substrate microstructured WC-Co electrodes: Deposition process, structure, and properties. Surface and Coatings Technology. – 2008, – V. 202. –p. 249.

5 Михайлов, В. В. Исследование особенностей электроискрового легирования титана и его сплавов: автореф. дис. канд. техн. наук. – Киев, 1977. – 19 с.

## **МНОГОКОМПОНЕНТНЫЕ ПОКРЫТИЯ TiN/Cu, СФОРМИРОВАННЫЕ МЕТОДОМ МАГНЕТРОННОГО РАСПЫЛЕНИЯ**

**А. В. Белый, С. Д. Латушкина, О. И. Посылкина, А. Г. Артемчик,  
И. А. Сечко**

Физико-технический институт НАН Беларуси  
г. Минск, Республика Беларусь

### **Введение**

Метод магнетронного распыления позволяет получать тонкопленочные покрытия с помощью катодного распыления материала в плазме аномально тлеющего разряда [1,2]. Одной из последних тенденций развития метода магнетронного распыления является использование для нанесения многокомпонентных покрытий композиционных мишеней [3]. Разновидностью таких мишеней являются «мозаичные мишени», которые состоят из матрицы одного металла со вставками других металлов, расположенными в зоне распыления магнетрона. Это дает возможность получать с помощью одного магнетрона многокомпонентные покрытия с различным содержанием элементов.

Однако процесс распыления составных мишеней представляет собой сложный и нелинейный процесс, что может вызывать изменение стехиометрического состава наносимых покрытий по отношению к составу мишени при изменении технологических параметров осаждения. Анализ показывает, что это может быть связано с рядом факторов [4]:

– изменение свойств поверхности многокомпонентной мишени под действием ионной бомбардировки из-за различия коэффициентов распыления входящих в ее состав материалов и диффузии компонентов из объема к поверхностному измененному слою;

– селективным рассеянием распыленных атомов рабочим газом.

Известно, что добавление легирующих элементов (Al, Cu, Cr, V) в покрытия на основе нитрида титана позволяет значительно улучшить их физико-механические свойства [5]. Так применение меди в качестве такого компонента повышает твердость, а также уменьшает модуль упругости и коэффициент трения получаемого покрытия [5]. Цель настоящей работы – изучить процесс формирования покрытий TiN/Cu методом реактивного магнетронного распыления с использованием составной мишени Ti-Cu.

### **Методика эксперимента**

Покрытия были получены с использованием системы магнетронного распыления несбалансированного типа на модернизированной установке ВУ-1А при остаточном давлении атмосферы 10–3 Па. Предварительная очистка образцов проводилась при потенциале смещения  $U = 1000$  В в среде аргона в течение  $t = 600$  с. Для распыления использовалась составная мишень Ti-Cu. Осаждение металлических покрытий проводилось на образцы из стали Р6М5 и 12Х18Н10Т. Формиро-

вание покрытий проводилось при силе тока на магнетроне от 1 до 4 А, время осаждения слоя составляло 30 мин., поток азота и аргона в камеру составляли 0,6 л/ч и 2,5 л/ч соответственно.

Рентгеноструктурный анализ покрытий проводился на рентгеновском дифрактометре POWDIX 600 в монохроматизированном  $\text{CoK}\alpha$  излучении, при напряжении 30 кВ и анодном токе 10 мА. Съёмки осуществлялись в непрерывном режиме со скоростью 0,01 град/с. Для расшифровки фазового состава использовалась картотека PDF-2. При обработке данных рентгеноструктурного анализа использовались программы автоматизированного программного комплекса «Crystallographica Search-Match» и «High Score Plus Demo».

Элементный состав покрытий TiN/Cu определяли электронным микронзондом JEOL JXA 8500-F. Трибологические испытания проводили на трибометре JLTB-02 (J&L Tech Co., Корея), работающем по схеме «шар – диск». Материал шарика сталь ШХ 15, твердость 58...63 HRC, нагрузка на шарик 1 Н, скорость вращения диска 380 об/мин, время испытаний 60 мин. Для сравнительных испытаний по определению коррозионной стойкости сформированных покрытий проводились электрохимические исследования при комнатной температуре в 3 %-ном водном растворе NaCl с использованием потенциостата Multi Autolab M 204.

### Результаты исследования и их обсуждение

Известно, что в несбалансированном магнетроне незамкнутые линии магнитного поля с периферии катода направлены к подложке. Поэтому из плазмы могут извлекаться ионные токи значительной плотности даже без внешнего смещения подложки. Такие несбалансированные магнетроны имеют большой потенциал для формирования слоев с улучшенными физико-механическими характеристиками [2].

При осаждении покрытий методом магнетронного распыления важным технологическим параметром является сила тока, подаваемого на мишень несбалансированного магнетрона. Исходя из различий в характеристиках элементов (таблица 1), можно предположить, что технологические параметры осаждения будут влиять на массоперенос элементов из мишени в покрытие.

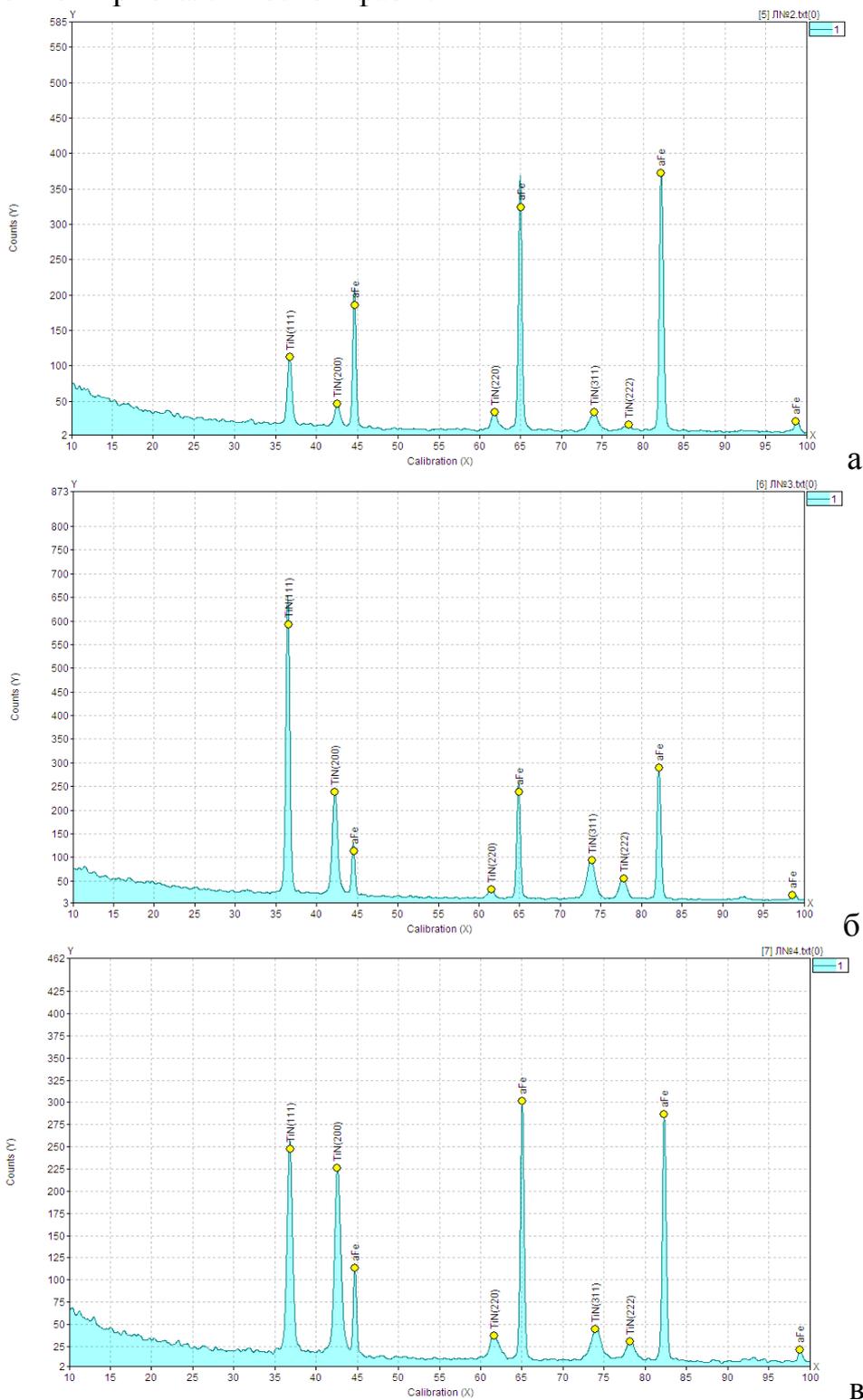
Таблица 1 – Свойства атомов титана и меди

Элемент	Масса атома, а.е.м.	Энергия ионизации, эВ	Коэффициент распыления
Титан (Ti)	47,867	6,8282	0,53
Медь (Cu)	63,546	7,7264	1,16

Эксперименты показали, что с увеличением силы тока на магнетроне и, как следствие, с изменением условий распыления, наблюдается уменьшение содержания меди в составе пленки от 7,50 % до 2,13 %.

По результатам рентгеноструктурного анализа в составе покрытий системы Ti-Cu-N наблюдаются только рефлексы от фазы нитрида титана (кубическая решетка) с параметрами кристаллической решетки  $a = 0,4247 - 0,4263$  нм и размером ОКР 3,11 – 3,63 нм (рисунок 1). Это свидетельствует о том, что, не смот-

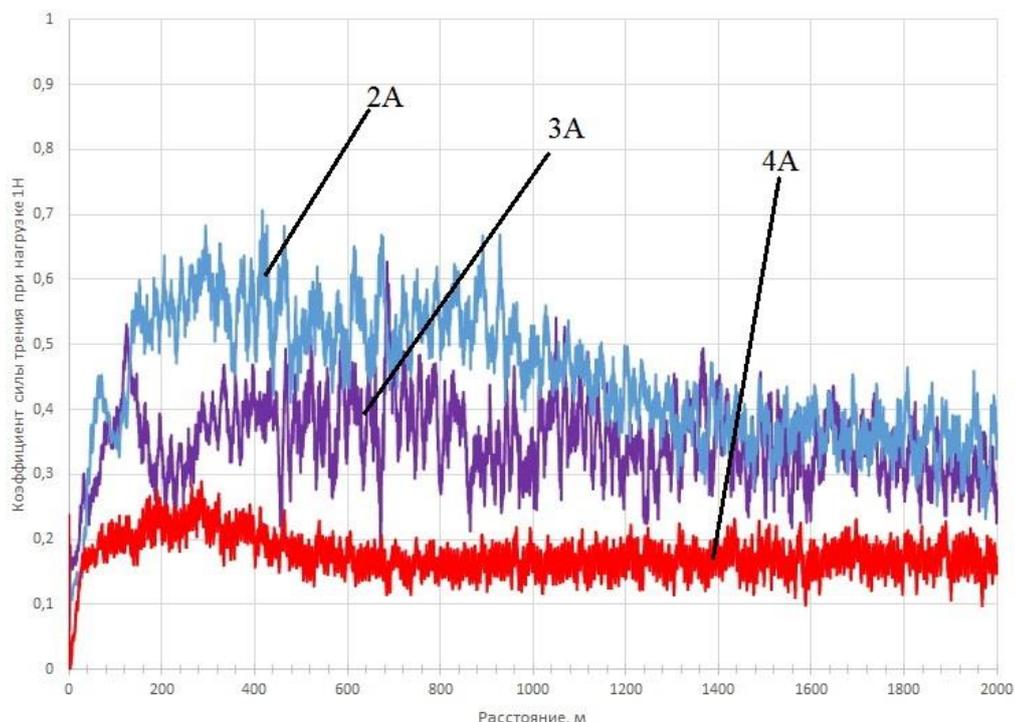
ря на наличие меди в составе покрытия (что подтверждает элементный анализ), она не образует соединений с титаном и азотом. Можно предположить, что атомы Си располагаются на границах зерен TiN в аморфном состоянии без образования собственной кристаллической фазы.



а – 2А, б – 3А, в – 4А

**Рисунок 1 – Рентгеновские дифрактограммы покрытий системы Ti-Cu- N (подложка 12X18Н10Т), сформированных при различных значениях тока магнетрона**

Фрикционные испытания показали, что наименьшая сила трения наблюдалась для покрытий TiN/Cu, осажденных при токе магнетрона 4 А (рисунок 2). В этом случае содержание меди в покрытии минимально. По-видимому, существенное влияние в этом случае оказывают как структура сформированного слоя, так и шероховатость его поверхности.



**Рисунок 2 – Коэффициенты трения покрытий TiN/Cu (подложка Р6М5) при различных значениях тока магнетрона**

Коррозионная стойкость пленок оценивались по значениям основных электрохимических характеристик (потенциала коррозии ( $E_{корр}$ ), плотности тока коррозии ( $I_{корр}$ ) (таблица 2).

**Таблица 2 – Электрохимические характеристики покрытий TiN/Cu (подложка 12X18H10T)**

Вид покрытия	Ток магнетрона, А	Элементный состав покрытия			Электрохимические характеристики		
		Ti, ат. %	Cu, ат. %	N, ат. %	$E_{ст}$	$E_{кор}$	$I_{кор} \cdot 10^{-7}$
TiN/Cu	1	33,11	7,50	59,39	-252	-88	2,68
	2	45,49	3,93	50,58	+29	-38	2,62
	3	47,22	3,51	49,27	+34	-25	1,51
	4	50,52	2,13	47,35	+432	+188	0,39

По результатам поляризационных измерений установлено, что покрытия с наименьшим содержанием меди имели наибольший стационарный потенциал и потенциал коррозии, а также минимальный ток коррозии, что свидетельствует о хорошей стойкости покрытий к коррозионному разрушению.

## **Выводы**

Анализ результатов исследования показал, что введение в состав покрытия меди в количестве 2–3 атм. % оказывает существенное влияние на его коррозионную стойкость и фрикционные свойства. Введение Cu в состав покрытия TiN позволяет добиться измельчения зерна, что в результате эффекта зернограничного упрочнения приводит к уменьшению коэффициента трения, а также улучшает антикоррозионные свойства покрытия за счет формирования наноразмерной структуры.

## **СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Достанко, А. П. Плазменные процессы в производстве изделий электронной техники. / А. П. Достанко [и др.] // под общ. ред. А. П. Достанко. – Мн. : ФУАинформ. – 2001. Том 2. – С. 453.
2. Берлин, Е. В. Получение тонких плёнок реактивным магнетронным распылением / Е. В. Берлин, Л. А. Сейдман. – М. : Техносфера, 2014. – 255 с.
3. Технологические особенности формирования покрытий Ti-Cr-B-N методом магнетронного распыления на постоянном токе / С. Д. Латушкина [и др.] // Литье и металлургия – 2019. – № 1. – С. 112–118.
4. Raven, M. S. Radio frequency sputtering and the deposition of high-temperature superconductors / M. S. Raven // J. Material science: Materials in electronics. – 1994. – Vol. 5. – P. 129–146.
5. Формирование износостойких наноразмерных покрытий TiN/Cu / С. Д. Латушкина [и др.] // Трение и износ. – 2016. – Т. 37. – № 1. – С. 36–41.

УДК 621.91

## **СТОЙКОСТНЫЕ ИСПЫТАНИЯ СВЕРХТВЁРДЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ cBN ДЛЯ ТОЧЕНИЯ ЗАКАЛЁННЫХ СТАЛЕЙ ТИПА СТАЛИ 45**

**Мартиновская О.В., Горбунов В.П.**

Брестский государственный технический университет,  
Республика Беларусь

Одной из причин сдерживающих широкое применение лезвийной обработки закалённых сталей инструментом оснащённым вставками из материалов на основе кубического нитрида бора (cBN), является достаточно узкий диапазон скоростей резания, соответствующий эффективной работе инструмента из сверхтвёрдых материалов [1]. Ошибочно принятая скорость резания приводит к интенсивному изнашиванию режущих кромок, что делает нецелесообразным использование дорогостоящего инструмента. Выявление диапазона наилучших скоростей обработки для конкретного материала режущего инструмента позволяет достичь стойкости инструмента, которая делает выгодным отказ от шли-

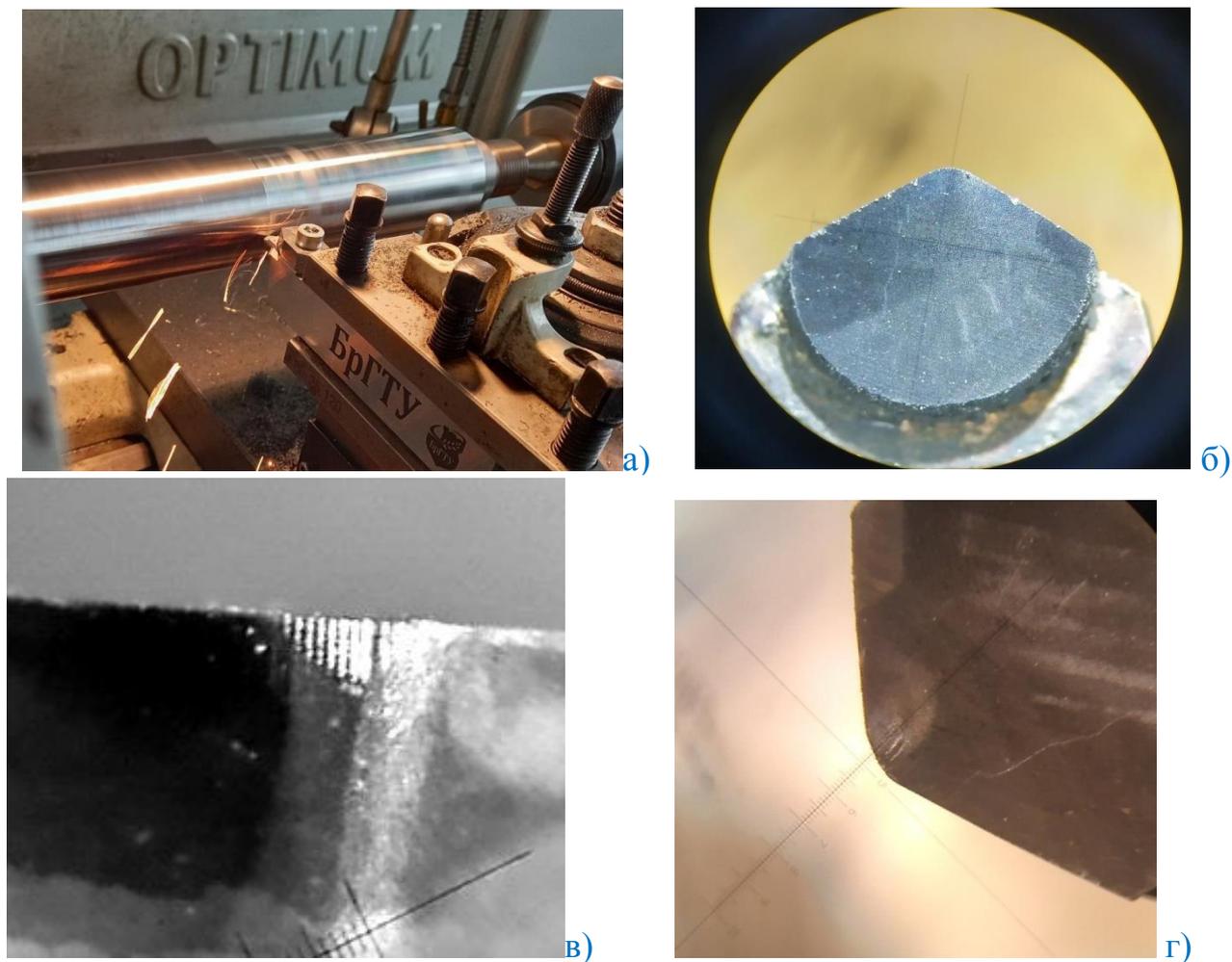
фования материалов после термической обработки. В данной статье приводятся результаты исследований проведённых на кафедре машиноведения БрГТУ материала, представляющего собой композит cBN–Al, содержащий около 95% cBN и 5% алюминия. Сплав синтезирован в лаборатории наноструктурных и сверхтвёрдых материалов ОИМ НАН Беларуси.

Задачей проводимых исследований является установление возможности применения резцов оснащённых сверхтвёрдым материалом на основе cBN взамен операции шлифования применяемой на производстве при обработке штоков гидроцилиндров, изготовленных из сталей 45 и подвергнутых закалке ТВЧ, до твёрдости поверхностного слоя 45 и 50 HRC. Качество получаемой поверхности должно соответствовать ряду жёстких требований связанных с условиями эксплуатации штока подвергаемого интенсивному износу. Основными требованиями кроме твёрдости поверхностного слоя являются шероховатость, точность обработки по 9 качеству и прямолинейность обрабатываемой поверхности 0,1 мм по всей длине штока. Шероховатость получаемая после первого прохода шлифовального круга  $Ra=0,63$ , после второго прохода -  $Ra=0,32$ . Однако, нежелательными последствиями применения операции шлифования являются поверхностные дефекты, а именно прижоги, микротрещины, вкрапления абразива, изменения структуры. Интенсивность шлифования приводит к быстрому износу круга, что влияет на отклонение обработанной поверхности от цилиндричности.

При работе лезвийным инструментом с большой скоростью и малой глубиной резания, в точке касания происходит локальное взаимодействие развивающееся в объёме детали и инструмента, следовательно не приводящее к серьёзным изменениям в поверхностном слое. Большая часть тепла оказывается сконцентрированной в стружке не успевая перейти в заготовку, тем самым не допуская самоотпуск и не изменяется структура поверхностного слоя.

Точение упрочнённых деталей инструментом со вставкой из сверхтвёрдых материалов на основе cBN (тонкое точение), позволяет обеспечить высокую точность полученных поверхностей и низкую шероховатость только при работе на высокоскоростных станках высокой точности и жесткости [2].

Стойкость режущего инструмента - один из главных факторов, влияющих на возможность его эффективного использования. Повышение стойкости влечёт за собой не только снижение расходов на инструмент, а так же затрат на переточку инструмента, но и сокращение времени простоя современного дорогостоящего оборудования. Следовательно, правильно подобранные режимы обработки, одновременно обеспечивающие качество поверхности, производительность и стойкость инструмента, позволяют повысить эффективность всего производства.



**Рисунок 1 – Экспериментальные исследования: а) наружное точение штока прямым проходным резцом; б) режущая часть резца с напаянной вставкой из композита cBN–Al; в) износ вставки по задней поверхности; г) износ вставки по передней поверхности**

Эксперименты проводились на токарно-винторезном станке Optimum D460x1000 DPA, отличающимся повышенной плавностью хода и отсутствием вибраций. На рисунке 1а представлен внешний вид процесса тонкого точения.

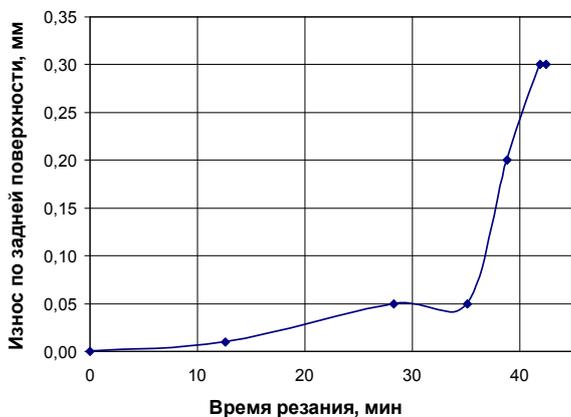
Проведённые исследования [3], показали, что оптимальными режимами при чистовом точении резцами с напаянными вставками из cBN–Al (рисунок 1б) являются подача  $S=0,049$ мм/об, скорость резания  $V=205$ м/мин, глубина резания  $t=0,05$ мм. Эти режимы позволяют получать приемлемую шероховатость  $Ra$  от 0,25 до 0,7мкм и минимальный износ по задней поверхности (рисунок 1в) при высокой производительности испытуемого инструмента. Представленные в работе [3] исследования позволили назначить геометрические параметры резца, наилучшим образом отвечающие рекомендациям для материалов на основе cBN используемых для тонкого точения: передний угол  $\gamma = -5^\circ$ ; задний угол  $\alpha = 10^\circ$ , радиус при вершине  $r = 0,6$ мм, углы в плане  $\phi = 45^\circ$ ,  $\phi_1 = 15^\circ$ , ширина упрочняющей фаски  $h = 0,2$ мм.

Дальнейшие испытания проводились с целью исследования стойкости резцов с учётом режимов резания и геометрических параметров инструмента, полученных в предварительных экспериментах. В качестве заготовок использовались цилиндрические образцы из стали 45 длиной 300мм, имеющие твёрдость поверхностного слоя HRC 50-52.

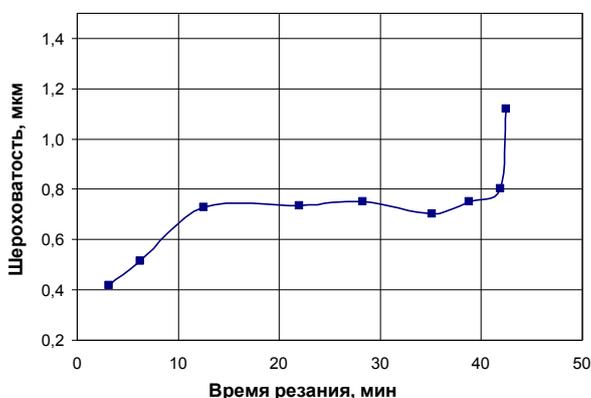
Все опыты проводились при постоянной частоте вращения шпинделя, но учитывая малую глубину резания, можно утверждать, что скорость резания практически не изменялась. После каждого опыта контролировалась шероховатость обработанной поверхности профилометром TR200, выпущенным компанией Time Group Inc, а резец периодически подвергали контролю износа по задней поверхности при помощи отсчётного микроскопа МПБ-3, цена деления 0,05мм.

В качестве критериев оценки стойкости инструмента были выбраны износ по задней поверхности инструмента  $h_z = 0,25\text{мм}$  [2] и шероховатость обработанной поверхности  $Ra = 0,7\text{мкм}$ . Износ по задней поверхности является наиболее распространённым критерием оценки стойкости инструмента. По достижению допустимого значения износа, инструмент ещё можно использовать некоторое время, но при этом строго следить за характеристиками качества обработанной поверхности. К тому же после определённых величин износа может происходить резкое, разрушение режущих кромок и поверхностей инструмента. Согласно рекомендациям [4], для пластин из сверхтвёрдых материалов критерием затупления вставок является нормальный износ по задней поверхности 0,4мм, это позволяет нам увеличить время эксплуатации инструмента, если получаемая шероховатость будет удовлетворять допустимому значению.

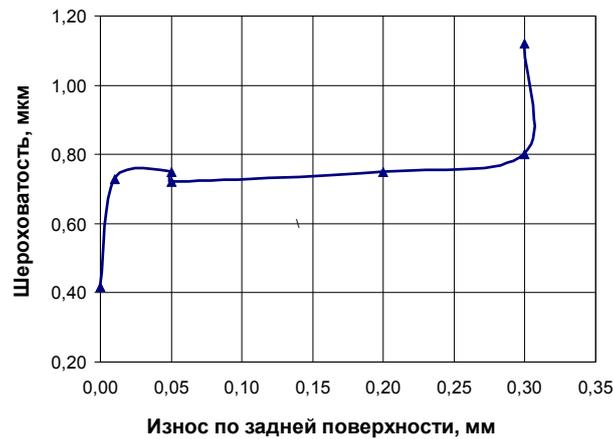
В процессе проведённых исследований, были установлены зависимости величины износа резцов из композита cBN–Al и изменение шероховатости обработанной поверхности от времени обработки. Экспериментальные кривые представлены на рисунке 2.



а)



б)



в)

**Рисунок 2 – Графики зависимостей по результатам экспериментов: а) шероховатость обработанной поверхности от времени обработки; б) износ инструмента от времени работы резца; в) шероховатость обработанной поверхности от износа инструмента по задней поверхности**

Анализ полученных кривых показывает относительно стабильные режущие свойства изучаемого материала. График на рисунке 2а показывает, что средняя стойкость резцов достигается при величине износа по задней поверхности 0,3мм и равна 42 минуты, после чего режущие свойства инструмента резко снижаются. При этом интенсивный износ начинается на 36 минуте, достигнув величины 0,3мм скорость износа снижается. Эксперимент останавливали при достижении износа 0,3мм, т.к. второй контролируемый параметр – шероховатость резко возрастал, достигая величин  $Ra = 1,1\text{мкм}$  (рисунок 2в).

Кривая представленная на рисунке 2б отражает изменение шероховатости в момент приработки инструмента и до потерей им допустимых режущих способностей. После первых 10 минут величина шероховатости стабилизировалась на отметке  $Ra = 0,7\text{мкм}$  и сохранялась на протяжении последующих 30 минут точения. Путь, пройденный вершиной резца за время износа по задней поверхности до  $h = 0,3\text{ мм}$ , составляет  $L=7175\text{м}$ .

Проведённые эксперименты позволяют провести планирование дальнейших исследований, определить параметры модели для прогнозирования поведения материала при различных режимах обработки.

В дальнейшем ставятся задачи используя обобщающие эмпирические уравнения для расчёта параметров обработки закалённых сталей резцами из нитрида бора определить оптимальное соотношение стойкости материала с режимами работы при заданной шероховатости, применительно к материалу  $\text{cBN-Al}$ , а так же композиту  $\text{cBN-wBN-AlB}_2/\text{AlN}$  и сравнить возможности применения обоих материалов.

**Выводы.** Проведенные исследования показали, что стойкость режущего инструмента с напаянной вставкой из композита  $\text{cBN-Al}$  составляет  $T=42\text{мин}$  и сопоставима с рекомендациями [4], согласно которому нормативная стойкость пластин из композита 10, работающего в аналогичных условиях  $T=58\text{ мин.}$ , но при скорости точения  $V=75\text{м/мин}$ . Исходя из этого, можно констатировать, что производительность обработки инструментом из композита  $\text{cBN-Al}$  выше в 2 раза.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Исследование режущих свойств резцов из нитрида бора / Грубый С. В., Лапшин В. В., Наука и образование, ФГБОУ ВПО МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. С.61-74
2. Обработка и упрочнение поверхностей при изготовлении и восстановлении деталей / В. И. Бородавко [и др.]; под общ. ред. М. Л. Хейфеца и С. А. Клименко. – Минск: Беларус. навука, 2013. – 463 с.
3. Мартиновская О.В., Горбунов В.П., Нерода М.В. Методика испытаний новых сверхтвердых материалов на основе cBN в качестве лезвийного инструмента для чистовой обработки // Новые технологии и материалы, автоматизация производства: Сборник статей междунар. науч.-техн. конф. / г. Брест, (20-21 октября 2022 г.) – Брест, 2022. – С.143 – 147.
4. ГОСТ Р 50302-92 Вставки перетачиваемые для сборного инструмента, оснащенные сверхтвердым материалом (композитом). Технические условия. / Госстандарт России, М.: 1992. – 16с.

УДК 621.789

## ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ СТАЛИ 10Г2 ПОСЛЕ ЛАЗЕРНОЙ ЗАКАЛКИ И ЛЕГИРОВАНИЯ

Миширук О.М.<sup>1</sup>, Веремейчик А.И.<sup>1</sup>, Девойно О.Г.<sup>2</sup>,  
Нерода М.В.<sup>1</sup>, Холодарь Б.Г.<sup>1</sup>

- 1) Брестский государственный технический университет, г. Брест,  
Республика Беларусь
- 2) Белорусский национальный технический университет, г. Минск,  
Республика Беларусь

Лазерные технологии поверхностной обработки в ряде случаев заменяют традиционные методы термической обработки. Это обусловлено преимуществами сфокусированного лазерного излучения: бесконтактностью и локальностью теплового воздействия, минимальной зоной термического влияния, высокими скоростями нагрева и охлаждения, снижением уровня остаточных напряжений, сведением к минимуму коробления, повышением дисперсности структуры [1]. Лазерная закалка может рассматриваться в качестве альтернативы поверхностному упрочнению цементацией и последующей объемной закалке, а также ионно-плазменному азотированию. Технология лазерной закалки сканирующим лучом без оплавления позволяет отказаться от шлифования поверхности после упрочнения.

Актуальность проблем, связанных с влиянием режимов лазерной закалки на структуру и свойства различных материалов, подтверждается многочисленными публикациями отечественных и зарубежных ученых [1–5]. Следует отметить, что в основном исследования заключаются в определении влияния режи-

мов лазерной закалки на износостойкость, а проблеме влияния лазерной обработки на прочностные характеристики и характеристики пластичности материала уделяется недостаточное внимание.

Для определения зависимости характеристик прочности и пластичности стали 10Г2 от режимов лазерной поверхностной обработки образцы подвергались лазерной поверхностной обработке излучением волоконного иттербиевого лазера мощностью 1 кВт с объективом для фокусировки лазерного излучения, системой перемещения и сканирующей лазерный луч головкой при различных режимах обработки (таблица 1) в лаборатории плазменных и лазерных технологий БНТУ. Размеры образцов: толщина – 6 мм, ширина – 20 мм и длина – 200 мм. На противоположных плоскостях образца с габаритными размерами 20x200 мм наносились 5 дорожек. Отступ от краев образца составил по 15 мм с каждой стороны, поэтому длина лазерных дорожек составила 170 мм. Обработка каждой дорожки осуществлялась в одном и том же направлении (рисунок 1). Размер лазерного пятна равен 0,35 мм. Расстояние от поверхности образца до последнего дефлектора составило 450 мм. При легировании на образцы предварительно наносилась смесь бора аморфного с ацетоном и клеем БФ-4.

Для определения прочностных характеристик после лазерной обработки образцы испытывались на статическое растяжение согласно ГОСТ 1497-84 «Металлы. Методы испытаний на растяжение» на машине разрывной Meitesi WDW-300 (Китай). Испытания образцов на растяжение проводились при нагружении со скоростью 5 мм/мин.

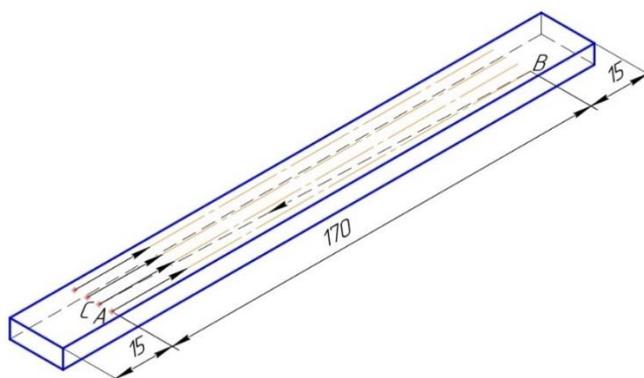


Рисунок 1 – Схема движения лазерного пятна по поверхности образца

Таблица 1 – Режимы лазерной обработки

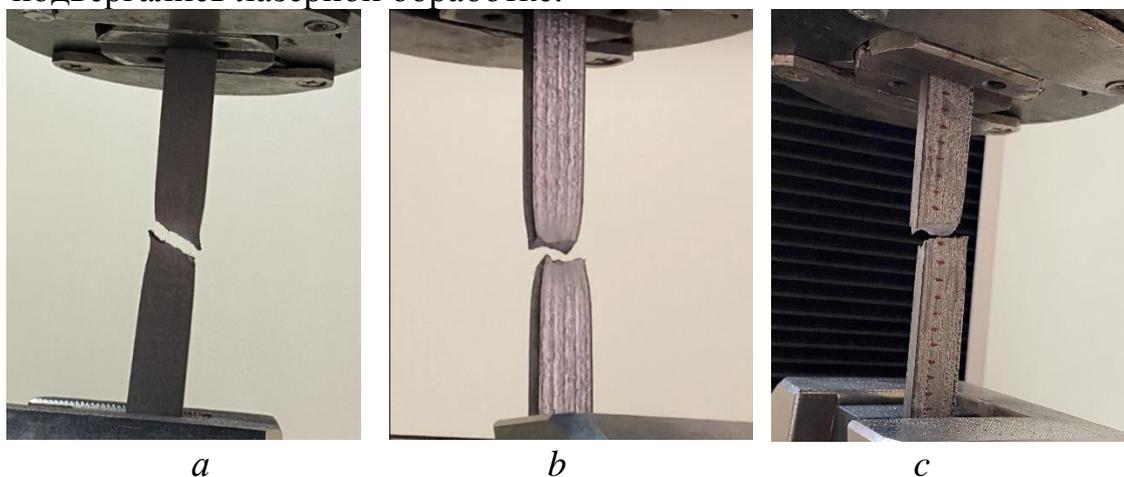
Вид обработки	Пятно сканирования, мм	Количество линий, шт	Частота сканирования, Гц	Скорость сканирования V, мм/мин	Номер образца
Закалка	4 × 2,25	7	220	300	1а, 1б, 1в
				500	2а, 2б, 2в
				700	3а, 3б, 3в
Легирование	4 × 2,25	7	220	300	4а, 4б, 4в
				500	5а, 5б, 5в
				700	6а, 6б, 6в

Примечание: в графе «Номер образца» 1, 2, 3, 4, 5, 6 – номер партии; а, б, в – номер образца в партии.

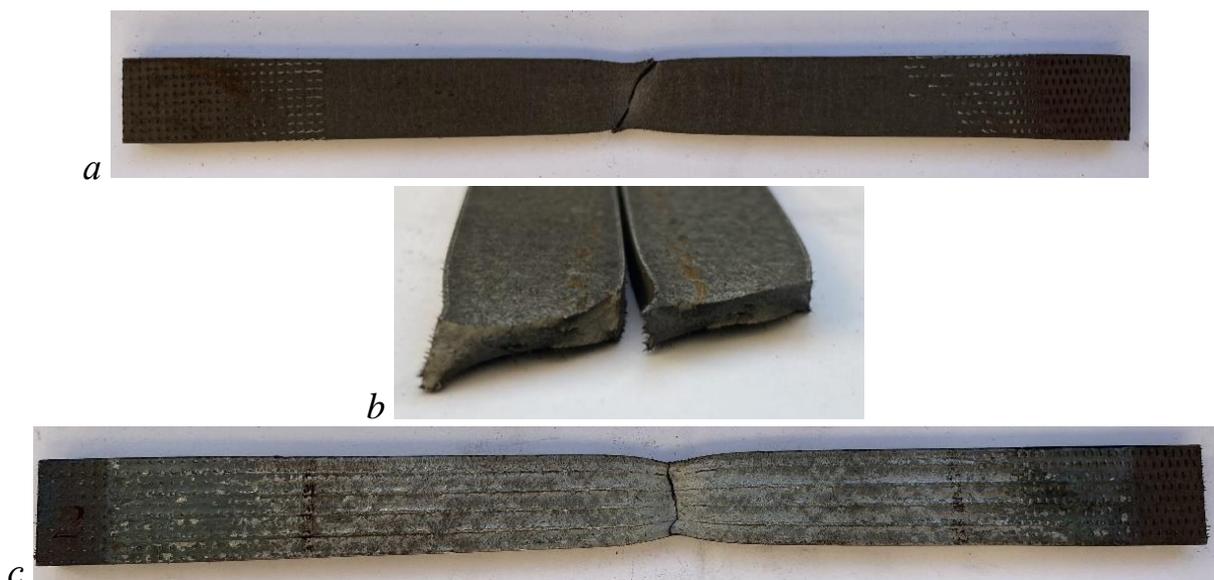
Разрушение необработанных (НО) и обработанных образцов происходило в пределах расчетной длины с образованием «шейки», уменьшением площади поперечного сечения в зоне разрыва и увеличением длины образца. Все закаленные и легированные образцы разрушились по сечениям, перпендикулярным направлению растягивающей нагрузки, а образцы, не подверженные лазерной закалке разрушились по сечениям, расположенным под углом к направлению растягивающей силы (рисунок 2).

Примеры разрушенных образцов и сечений разрушения приведены на рисунке 3. На всех образцах присутствует значительный наклеп поверхностных слоев.

По результатам проведенных испытаний были построены зависимости возникающих в образцах напряжений  $\sigma$  от деформаций  $\epsilon$  (рисунок 4). Для удобства сравнения графиков выполнено их наложение на графики образцов, которые не подвергались лазерной обработке.



**Рисунок 2 – Испытания образцов материала на растяжение:  
a – необработанный, b – после закалки, c – после легирования**



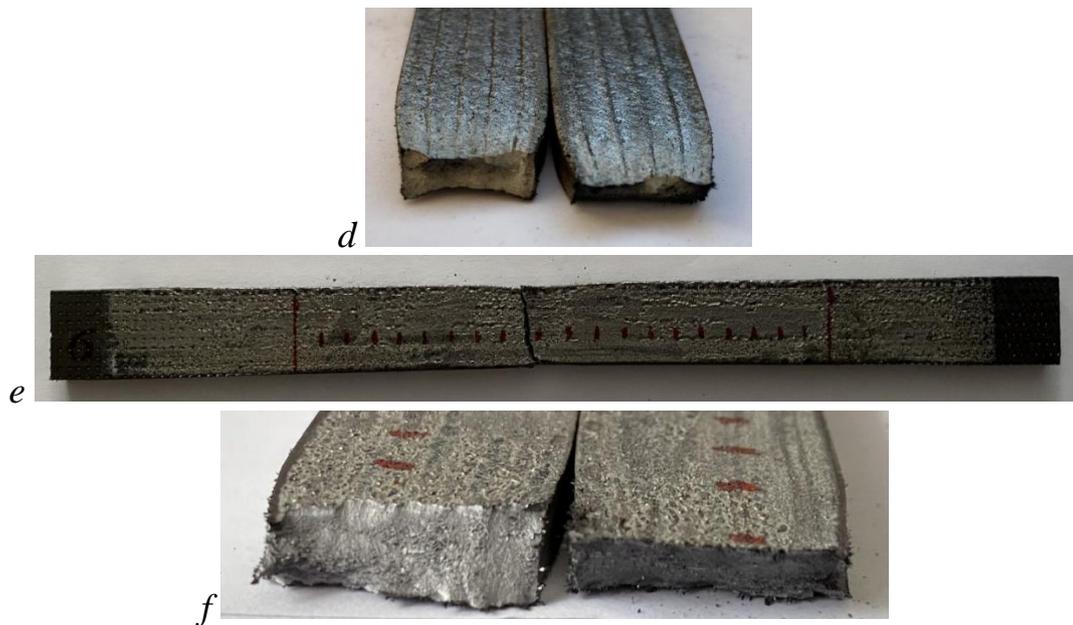


Рисунок 3– Разрушенные образцы (*a, c, e*) и сечение разрушения (*b, d, f*):  
*a, b* – образец НО2; *c, d* – образец 1б; *e, f* – образец ба

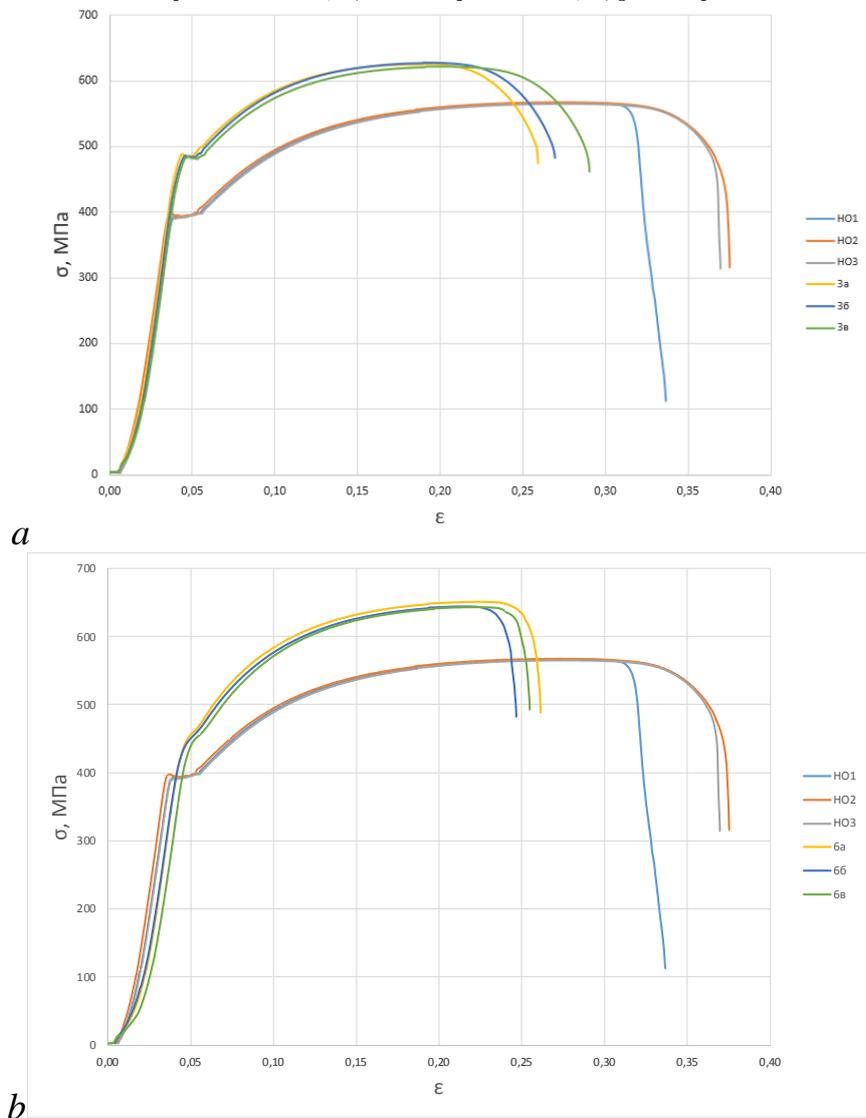


Рисунок 4 – Диаграммы растяжения при  $V=700$  мм мин  
*a* – партия № 3 (лазерная закалка), *b* – партия № 6 (лазерное легирование)

Анализ диаграмм растяжения указывает на незначительное влияние режимов лазерной закалки (скорости сканирования) на величину модуля упругости материала в исследуемом диапазоне параметров. В то время как при лазерном легировании диаграммы растяжения указывают на более значительное влияние режимов обработки (скорости сканирования) на модуль упругости материала. Разрушение закаленных и легированных образцов произошло с незначительным снижением уровня разрушающих деформаций.

Результаты показывают, что максимальное напряжение для всех подвергнутых закалке и легированию образцов увеличилось в сравнении с необработанными образцами: на 14% для партий № 1, № 6; на 13% для партии № 5; на 10% для партий № 2, № 3, № 4. Установлено, что при лазерной закалке максимальное значение временного сопротивления соответствует наименьшей скорости сканирования (300 мм/мин). При лазерном легировании наибольшее значение временного сопротивления соответствует максимальной скорости сканирования (700 мм/мин). Следует отметить незначительное снижение характеристик пластичности при лазерной закалке: относительное удлинение закаленных образцов не превышает 17–23 % при аналогичном параметре для исходных образцов 31 %. В то время как при лазерном легировании характеристики пластичности снизились более чем в два раза: относительное удлинение легированных образцов составило 6–15%. Снижение характеристик пластичности связано со значительным повышением твердости закаленной и легированной зоны и наличием микротрещин на ее поверхности.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Использование лазерных технологий упрочнения в сельскохозяйственном машиностроении / В. С. Голубев [и др.] // Современные методы и технологии создания и обработки материалов: сб. науч. тр. : в 3 кн. / Гос. науч. учреждение «Физ.-техн. ин-т НАН Беларуси»; редкол.: А. В. Белый (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2018. – Кн. 2: Технологии и оборудование механической и физико-технической обработки. – С. 58–65.

2. Девойно, О. Г. Обеспечение ресурсных параметров ответственных элементов механических трансмиссий с использованием поверхностных слоев, формируемых лазерными технологиями [Электронный ресурс] / О. Г. Девойно, И. В. Швец // Теоретическая и прикладная механика: междунар. науч.-техн. сб. / Белорус. нац. техн. ун-т; редкол.: А. В. Чигарев (пред. редкол.) [и др.]. – Минск: БНТУ, 2019. – Вып. 34. – С. 266–270.

3. Лазерные технологии обработки материалов: современные проблемы фундаментальных исследований и прикладных разработок / под ред. В. Я. Панченко. – М.: Физматлит, 2009. – 664 с.

4. Denesh Babu, P. Laser surface hardening: A review / P. Denesh Babu, K. R. Balasubramanian, G. Buvanashakaran // Int. J. Sci. Eng. – 2011. – Vol. 5. – P. 131–151. <http://doi.org/10.1504/IJSURFSE.2011.041398>.

5. Хошинов, В. А. Закономерности формирования пластичности и вязкости низко- и среднеуглеродистых сталей и разработка методов их оценки : дис. ... канд. техн. наук : 05.16.01 / В. А. Хошинов. – Екатеринбург, 2020. – 299 л.

**МОРФОЛОГИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ,  
МОДИФИЦИРОВАННЫХ МЕХАНОАКТИВИРОВАННЫМИ  
НАНОФАЗНЫМИ ЧАСТИЦАМИ**

**Овчинников Е.В.<sup>1</sup>, Хвисевич В.М.<sup>2</sup>, Григорьева Т.Ф.<sup>3</sup>,  
Эйсымонт Е.И.<sup>1</sup>, Пинчук Т.И.<sup>4</sup>, Веремейчик А.И.<sup>2</sup>, Кузнецова Е.В.<sup>1</sup>**

- 1) Гродненский государственный университет им. Янки Купалы, г. Гродно, Республика Беларусь
- 2) Брестский государственный технический университет, г. Брест, Республика Беларусь
- 3) Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация
- 4) Институт порошковой металлургии имени академика О.В. Романа, г. Минск, Республика Беларусь

Механическая активация (МА) – это хорошо известный с доисторических времен метод, когда во время измельчения различного типа материалов могли случайно возникнуть физико-химические реакции, например, при обработке такого природного материала, как кремень, при производстве из него изделий для переработки продукции растительного и животного сырья, производства различного типа оружия. В дальнейшем данный материал, как и технология воздействия на него, нашли активное применение при производстве первых огнестрельных вооружений и, в частности, ружей и пистолетов.

Первые записи о систематических исследованиях механохимии были зарегистрированы Спринг и Леа в конце XIX века. Тем не менее, Оствальд ввел вперые термин «механохимия», чему была посвящена научная работа, вышедшая в 1919 г. Механическая активация обычно проводится на различных типах мельниц. Первыми прототипами мельниц была ступа и пестик, которые изготавливались из различного типа материалов исходя из требований твердости к измельчаемому материалу. Во времена промышленной революции процесс измельчения твердых пород значительно облегчился благодаря изобретению привода паровой машины (после 1850 г.), таким образом появились шаровые или вальцовые мельницы. Вертикальные валковые мельницы были созданы между 1900 и 1920 г.г., а в середине XX века появились автогенные и полусамозмельченные мельницы. Первая истрательная мельница была изобретена Сегвари примерно в 1930 году. Она представляла собой низкоскоростную вертикальную мельницу с мешалкой. Высокоскоростная мельница с мешалкой была представлена примерно в 1990 году. Для описания процессов, происходящих при измельчении твердых тел, Тиссен предложил модель «магма-плазма» (Thiessen и др., 1967). Согласно этой теории многие процессы возбуждения возникают из-за механической энергии, характеризующейся разными временами релаксации (Baláz, 2008). Суть данного наиболее распространенного метода заключается в рассмотрении действия одиночного удара о твердую поверхность. В зависимости от энергетического воздействия при ударе

возможно протекание следующих процессов: экзоэмиссия электронов; образование микроочага плазмы, вызванного повышением температуры в точке удара; искажение структуры поверхности.

В настоящее время существует достаточно количество моделей в области механохимии, например, Ткацова и Балаз из Словакии, Болдырева из России, Gock из Германии (Gock, Kutter, 1998), Опочки и Юхас из Венгрии (Juhász and Oroszky, 1990), Сенна из Японии (Сенна, 2017), Кумар из Индии (Кумар и др., 2010), Такач и Сурьянараяна из США (Такач, 2013; Сурьянараяна, 2001).

Механическая активация и механическое легирование являются основными методами для создания дополнительной высокой добавленной стоимости при производстве композиционных материалов из различных веществ. Данный метод является экологически безвредным и относится к «зеленым» технологиям, позволяя в большинстве случаев заменить активацию материалов с применением вредных растворителей. Многочисленные статьи и обзоры, посвященные вопросам механохимии [1–5], в большинстве своем сосредоточены на изложении материала по диспергированию веществ, однако фактически не затрагивают фазовое превращение твердого материала, которое сильно зависит от технологии и конструкции применяемого оборудования. Более того, обстоятельства связанные со структурными превращениями являются ключевыми, которые можно использовать для управления механохимическими реакциями, чтобы реализовать потенциал метода по сознательному созданию дизайна получаемого продукта, т.е. осуществлению инженерии частиц [6].

Модифицирование высокомолекулярных соединений и многотоннажно выпускаемых полимерных материалов различными видами механоактивированных частиц, в том числе содержащих нанофазы и наноструктуры, представляет значительный интерес как в научных целях, так и для применения в промышленности. Это связано с высокими параметрами физико-механических свойств, достигаемыми при низкой концентрации модификатора. Улучшения свойств может затрагивать как структурные (степень кристалличности и т.п.), так и функциональные свойства (например, тепло- и электропроводность).

Механоактивированные нанокompозиты могут содержать как неорганические или органические наполнители, размер которых по крайней мере в одном измерении находится в нанометровом диапазоне. Механоактивированные наноразмерные частицы могут формироваться в процессе получения композиционного материала или вводиться в полимеры в виде предварительно сформированных частиц. Механоактивированный нанонаполнитель *in situ* может быть получен в результате реакций органического или неорганического сырья, дисперсных наполнителей, средний размер частиц которых может находиться в микронном диапазоне (например, расслоение слоистых силикатов). Как традиционные наполнители и армирующие материалы, механоактивированные наночастицы могут быть сгруппированы по их форме и, следовательно, соотношению сторон (отношение длины к толщине). Соответственно, данные частицы могут иметь сферическую (шаровидную), пластинчатую (дискообразную) и волокнистую (трубчатую, игольчатую) форму.

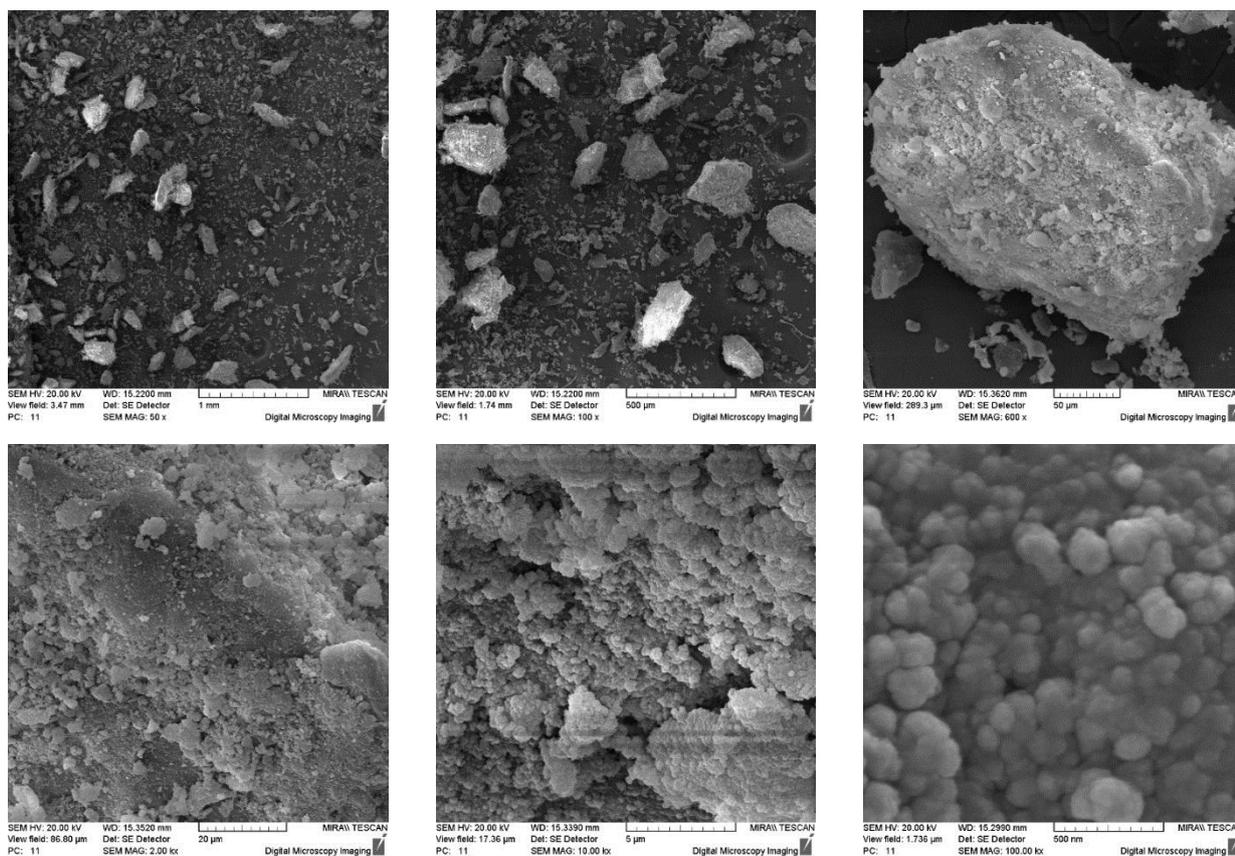
Эффективность модифицирующего действия «механоактивированных» полимеров связана с размером наполнителя и взаимодействием на границе

наполнитель-матрица. В эффекте действия механоактивированного наполнителя на полимерную матрицу выделить два аспекта: (I) вероятность возникновения дефектов, вызывающих преждевременный отказ полимерного изделия при эксплуатации, уменьшается с уменьшением размера механоактивированных твердых частиц тел и (II) зависимость природы происхождения механоактивированной частицы от природы модифицируемого полимера; в ряде работ показано, что нанометровые частицы одинаковой природы с модифицируемой матрицей ведут себя как идеальные кристаллы и их физико-механические характеристики приближаются к теоретически рассчитанным параметрам.

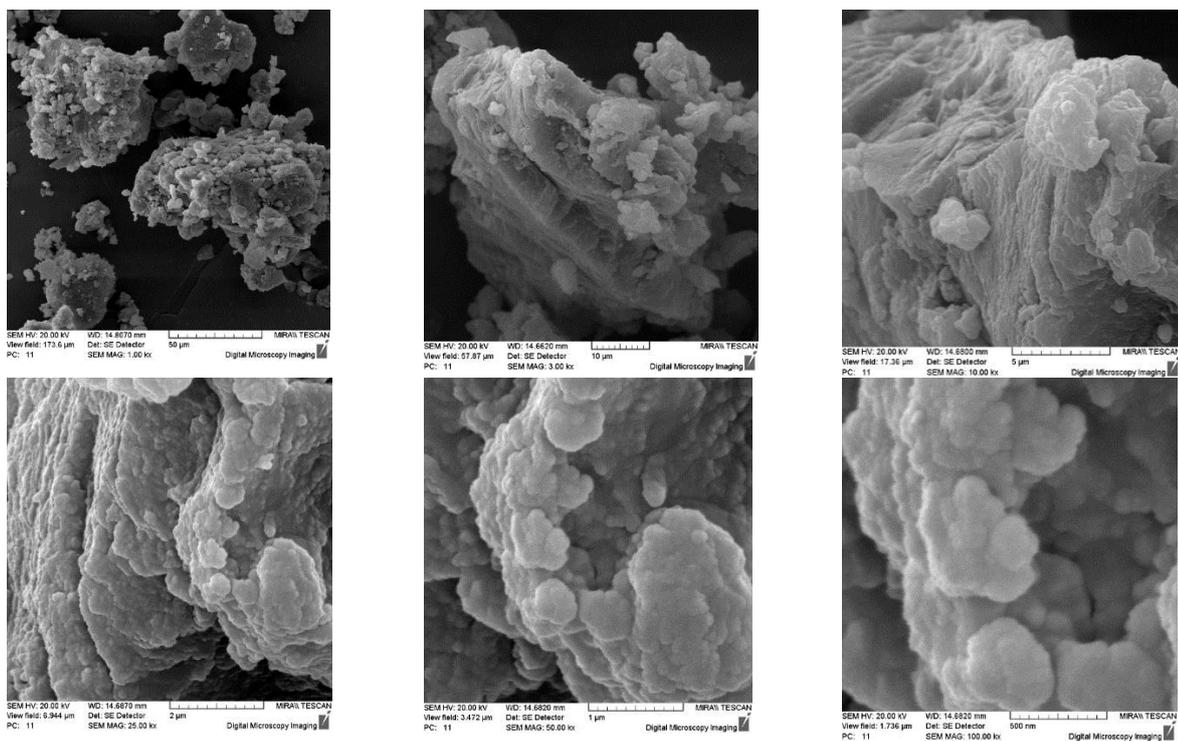
Проведены исследования морфологии композиционных материалов, модифицированных механоактивированными нанофазными частицами методом оптической и растровой микроскопии, согласно которых возможно предположить, что возрастание значений дисперсности механоактивированных частиц приводит к увеличению модифицирующего действия в полимерной, полимер-олигомерной и олигомерной матрице.

На рисунках 1, 2 представлены изображения морфологии композиционных частиц, полученных механосовмещением оксида кремния с одноосновными кислотами (теариновая и лауриновая кислота).

При механоактивации неорганических и органических дисперсных систем образуются наноразмерные частицы, свойства которых будут отличаться от свойств объемных веществ, образующих данные частицы.



**Рисунок 1 – Морфология нанодисперсных механоактивированных частиц  $\text{SiO}_2$  (80 % мас.)+стеариновая кислота (20 % мас.) в течение 60 с при 60 г**



**Рисунок 2 – Морфология нанодисперсных механоактивированных частиц  $\text{SiO}_2$  (80 % мас.)+лауриновая кислота (20 % мас.) в течение 60 с при 60 г**

Наблюдается увеличение удельной поверхности данных частиц при проведении механоактивации. Возможно ожидать высокой модифицирующей активности данных веществ при введении данных частиц в полимерную матрицу различной природы.

Данный эффект обусловлен высокими энергетическими состояниями механоактивированных частиц, находящимися в высокодисперсном состоянии. В структуре модифицированной полимерной матрицы в общем случае (термопластичной, реактопластичной) наблюдается распределение кластерных структур различного строения. Независимо от структуры МА частиц и их активности в общем случае наблюдается агрегация данных низкоразмерных объектов в ряде случаев с образованием структур микронного размера. В большинстве случаев образованные структуры в объеме полимера являются пластинчатыми, висцерными, глобулярными. Необходимо отметить, что применение инкапсулированных в полимерную оболочку механоактивированных частиц позволяет снизить резкую границу раздела между модифицируемой полимерной матрицей и механоактивированным модификатором. Предложена физическая модель формирования механоактивированных частиц на основе образования зарядовых активных центров при совместном диспергировании неорганических и органических компонентов. Установлено, что с увеличением количества активных центров на ядре механоактивированной частицы происходит возрастание активности образованной МА частицы. Увеличение значений активности механоактивированной частицы приводит к большему модифицирующему эффекту при введении данных объектов в полимерную матрицу.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Механоактивированные композиционные материалы на полимерной основе / Е. В. Овчинников, [и др.] // Natural and synthetic polymers for medical and technical purposes: тезисы докладов междунар. науч. конф., Минск, 27 – 29 апреля 2022 г. – Минск: Издательство Вита, 2022. – С. 201–205.

2. Механохимический синтез дисперсных слоистых композитов на основе каолинита и ряда органических и неорганических кислот. Исследование методом ИК-спектроскопии / Т. Ф. Григорьева [и др.] // Неорганические материалы. – 1996. – Т. 32, № 2. – С. 214–220.

3. Овчинников, Е. В. Физико-механические характеристики углеродных волокон, модифицированных поверхностно-активными веществами / Е. В. Овчинников // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. – 2019. – № 3 (66). – С. 38–47.

4. Ворсина, И. А. [и др.] Структурные особенности механоактивированной системы «полиамид ПА-6 и силикат» // Веснік ГрДУ, сер. 6. – 2013. – № 3 (158). – С. 6–11.

5. Физические основы модифицирования полимеров допинговыми добавками слоистых минералов / Г. А. Кузнецова [и др.] // Материалы, технологии, инструменты. – 2002. – № 4. – С. 54–58.

6. Механоактивированные наполнители для полимерных нанокомпозитов на основе регенерированных термопластов / Т.Ф. Григорьева [и др.] // Веснік ГрДУ, сер. 6. - 2011. - № 1 (116). - С. 25-28.

УДК 621.793:66.088

## МОРФОЛОГИЯ ВЫСОКОЭНТРОПИЙНЫХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ РЕФРАКТОРНЫХ МЕТАЛЛОВ

**Овчинников Е.В.<sup>1</sup>, Чекан Н.М.<sup>2</sup>, Хвисевич В.М.<sup>3</sup>,  
Акула И.П.<sup>2</sup>, Веремейчик А.И.<sup>3</sup>**

1) Гродненский государственный университет им. Янки Купалы, г. Гродно, Республика Беларусь

2) Физико-технический институт НАН Республики Беларусь, г. Минск, Республика Беларусь

3) Брестский государственный технический университет, г. Брест, Республика Беларусь

Применение плазмохимических покрытий, получаемых по различным технологиям формирования, позволяет существенно увеличить эксплуатационный ресурс металлообрабатывающего инструмента, различных пар трения: металл-металл, металл-полимер, металл-керамика, керамика-керамика и т.д. В последнее время широкое применение находят плазмохимические нанокомпози-

ционные покрытия. Согласно данным работ [1–5], наноконпозиционные покрытия формируются только на оборудовании фирмы с вертикальными близкорасположенными вращающимися катодами. Структура данных покрытий представляет зерна по геометрическим размерам, находящимся в наноразмерной области. Данные зерна распределены в аморфной матрице покрытия [1–5]. Матрица формируется при одновременном распылении Ti и Al, так называемые покрытия nAlCo. Возможно формирование покрытий при распылении Al и Cr – nAlCrO. Формируемые покрытия на базе AlTiN относятся к классу сверхтвердых и характеризуются высокими внутренними напряжениями. Однако получение нанодисперсной структуры позволяет сформировать поверхностные слои, обладающие как высокой твердостью, так и высокой эластичностью. В настоящее время большой интерес представляют высокоэнтропийные покрытия. Термин «высокоэнтропийные покрытия» заимствован из определения понятия «сплав с высокой энтропией», которое было предложено Йен-Веем ЙеЙе. Определение высокоэнтропийного сплава можно разделить на две основные составляющие – это композиция, составляющая сплав и фазы обладающие высокой энтропией в данной композиции или сама композиция, обладающая высокой энтропией вследствие синергического сочетания химических элементов, входящих в сплав. Одним из распространённых определений высокоэнтропийного покрытия является следующее – это вакуумные слои, содержащие более пяти основных элементов сконцентрацией от 5 до 35 ат. % .

Для определения энтропии в данном случае применяется формула:

$$\Delta S = -R \sum_{i=1}^n c_i \ln c_i, \quad (1)$$

где  $R$  – газовая постоянная,  $c_i$  – молярная доля химического элемента;  $n$  – общее количество составляющих элементов в сплаве (покрытии).

Исходя из значений энтропии предлагается следующая классификация покрытий:

- низкоэнтропийные –  $\Delta S < 0,69R$ ;
- среднеэнтропийные –  $0,69R < \Delta S < 1,61R$ ;
- высокоэнтропийные –  $\Delta S > 1,61R$ .

В случае если системы обладает значениями энтропии, относящимися к высокоэнтропийным системами, то тогда существует высокая вероятность образования твердых растворов с гранецентрированной кубической или объёмноцентрированной кубической структурой, вместо структур, которые соответствуют сложным интерметаллидам. В связи с большим разнообразием легирующих элементов в высокоэнтропийных сплавах, происходит достаточно серьезные искажения кристаллической решетки. Искажение кристаллической решетки препятствует движению дислокаций, что как и в случае дисперсионного упрочнения приводит к возрастанию прочности, твердости, износостойкости формируемых поверхностных слоев. Также определяющим фактором в процессе формирования высокоэнтропийных покрытий является подбор соответствующих элементов и регулирования концентрационной зависимости между ними. Особый состав и структура делают ВЭП (высокоэнтропийные покрытия) системы обладателями уникального соотношения высокой прочности/твердости,

исключительной стойкости к высокотемпературному окислению, износостойкостью, высокой радиационной стойкостью, коррозионной и стойкостью к окислению. Свойства ВЭП напрямую связаны с регулированием относительно содержания и равномерного распределения компонентов, что особенно важно при подготовке формирования данного типа покрытий. Одной из характеристик, которое оказывает существенное влияние на триботехнические характеристики покрытий является морфология, формируемых высокоэнтропийных слоев.

Целью исследований являлось исследование морфологии высокоэнтропийных покрытий, получаемых плазмохимическим осаждением в вакууме. В качестве объекта исследований использовали покрытия AlTiSi (C,N) покрытия. Нанесение покрытий осуществлялось в вакуумной установке УВНИПА-1-001, оборудованной катодно-дуговым испарителем с системой электромагнитной фильтрации плазмы, а также ионным источником ИИ-4-0,15. Для удаления тонкого приповерхностного слоя толщиной порядка 100 – 300 нм, содержащего загрязнения, перед нанесением покрытия образцы подвергались интенсивной обработке высокоэнергетичными ионами аргона. При этом происходит нагрев поверхностей до 450 С, разрушение окисных пленок и частичное удаление растворенных в металле газов.

Обработка проводилась при следующих параметрах: давление аргона в вакуумной камере  $1,5 \times 10^{-2}$  Па; ток фокусирующего соленоида 3,0 А; ускоряющее напряжение 3500 В при токе 0,06 А. Время ионно-лучевой обработки составляло 30 мин. Для повышения эффективности ионно-лучевой очистки и увеличения глубины проникновения ионов аргона на обрабатываемые изделия подавался отрицательный электрический потенциал 800 – 1500 В. Осаждение покрытия проводилось при токе стабилизирующей катушки 1,7 А, токе управляющей катушки 2,0 А и токе дуги 90 А. Давление реакционного газа (азот) находилось в пределах  $(0,87 - 5) \times 10^{-2}$  Па.

Условия формирования покрытий в зависимости от номера субстрата следующие:

покрытие на образце №1 – слой AlTiSi (ток 55 А, напряжение смещения минус 100 В);

№2 – слой AlTiSi (ток 55 А, напряжение смещения минус 100 В) + слой AlTiSiN (ток 55 А, напряжение смещения минус 50В,  $P_{N_2} \sim 1,1 \cdot 10^{-2}$  Па);

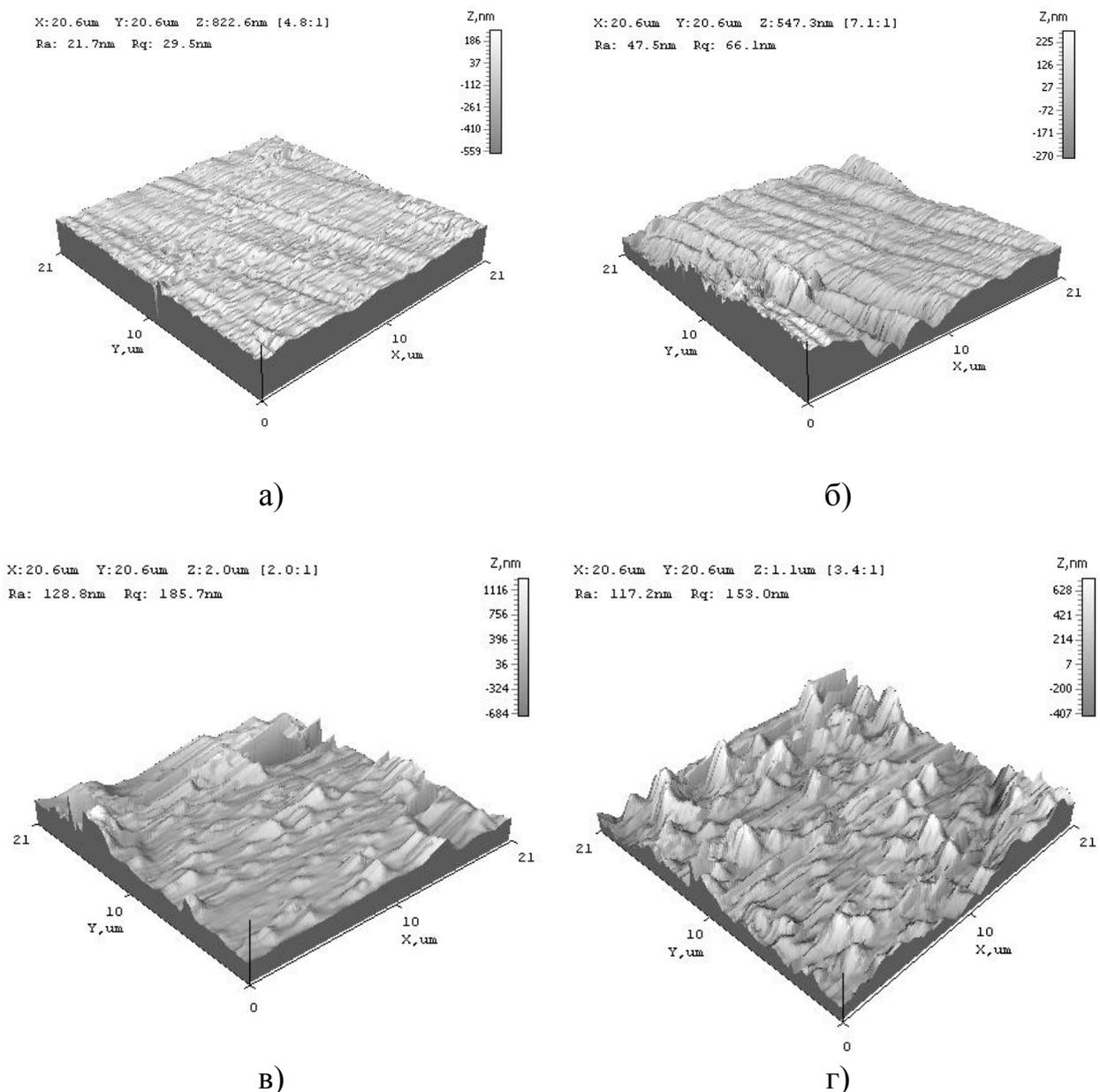
№3 – слой AlTiSi (ток 55 А, напряжение смещения минус 100 В) + слой AlTiSiN (ток 55 А, напряжение смещения минус 50В,  $P_{N_2} \sim 1,8 \cdot 10^{-2}$  Па);

№4 – слой AlTiSi (ток 55 А, напряжение смещения минус 100 В) + слой AlTiSiNC (ток 55 А, напряжение смещения минус 50В,  $P_{N_2} \sim 1,8 \cdot 10^{-2}$  Па,  $P_{C_2H_2} \sim 0,8 - 1,0 \cdot 10^{-2}$  Па).

Изображения морфологии поверхности и профиля стальной подложки получали с помощью АСМ. Данные исследований представлены на рисунке 1. Поверхность стальной подложки имеет множество микроцарапин и микровыпуклостей со средней шероховатостью 20 – 40 нм и средней квадратичной шероховатостью 30 – 60 нм соответственно.

Чтобы получить полную информацию о топографии поверхности исследуемых образцов проводили съемку образца во взаимно перпендикулярных направлениях. Установлено, что независимо от направлений съемки образца наблюдалось наличие крупных микроцарапин шириной 5 – 20 мкм и глубиной 50 – 120 нм, как показано на рисунке 1 (а).

Наоборот, размеры зернистых структур очень малы по сравнению с микроцарапинами. Гранулированные структуры имеют размер 100 – 500 нм и глубину 5 – 50 нм. Отметим, что образцы исходной стали имеют относительно гладкую структуру поверхности с низкими параметрами шероховатости по отношению к покрытиям, сформированным на данных субстратах.



а – образец №1 с покрытием; б – образец №2 с покрытием; в – образец №3 с покрытием; г – образец №4 с покрытием. 2D-изображение получено методом АСМ. Площадь сканирования 20×20 мкм

Рисунок 1 – Морфология поверхности высокоэнтропийных покрытий на стали 45

Проведены исследования морфологии и шероховатости высокоэнтропийных сверхтвердых покрытий в зависимости от технологических условий получения. В структуре покрытий образуется достаточно большое количество образований сферической формы, латеральные размеры которых находятся в нанодиапазоне. Размеры и форма получаемых образований зависит от технологических режимов формирования покрытий. Так, морфология покрытия AlTiSi характеризуется большим количеством крупных глобулярных образований с невысокой высотной характеристикой по оси Z. Введение в вакуумную камеру азота приводит к дальнейшему укрупнению глобулярных структур с увеличением размеров по оси Z, с уменьшением концентрации в поверхностных слоях покрытия. Увеличение концентрации азота в вакуумной камере при формировании покрытия приводит (образец №3 с покрытием) к увеличению концентрации сферических образований с уменьшением латеральных размеров в плоскости XY.

В покрытиях AlTiSi(C,N) наблюдается большое количество включений, находящихся по размерам в микронной области. Данные образования являются агломератами более низкоразмерных частиц. Возможно, данные частицы являются фазами трехкомпонентных и более соединений, наподобие MAX-фаз. Проведенный анализ по определению количества данных частиц в исследуемых образцах показал зависимость концентрации данных частиц от значений удельной поверхностной энергии, которая определялась условиями формирования покрытий.

Полученные результаты могут быть использованы на металлообрабатывающих предприятиях министерства промышленности Республики Беларусь, в частности ОАО «Белкард», ОАО «Белтапаз», УП «Цветлит», для формирования износостойких, антиадгезионных покрытий для металлообрабатывающего инструмента и технологической оснастки, предназначенной для переработки полимеров и металлов.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Вакуумно-дуговые устройства и покрытия / Андреев А. А. [и др.]. – Харьков: ННЦХФТИ, 2005. – 236 с.
- 2 Овчинников, Е.В. Формирования тонкопленочных покрытий при воздействии технологических факторов / Е. В. Овчинников // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сборник научных трудов / ДонНТУ. Донецк, 2013. – Выпуск 1, 2 (45). – С. 197–205.
- 3 Mashiki T. [et al.] TiAlN film preparation by Y-shape filtered-arc-deposition system // Thin Solid Films. – 2008. – Vol. 516. – P. 6650-6654.
- 4 Овчинников, Е. В. Особенности наноструктурированных покрытий при воздействии энергетических факторов / Е. В. Овчинников // Веснік ГрДУ, сер. 6. – 2011. – № 1 (116). – С. 5–13.
- 5 Быстров, Ю.А. Плазмохимический синтез карбидных соединений в потоке металлической плазмы вакуумно-дугового разряда / Ю. А. Быстров, Н. З. Ветров, А. А. Лисенков // Письма в ЖТФ. – 2008. – Т. 34. – Вып. 17. – С. 20–25.

## ИОННО-ПЛАЗМЕННОЕ АЗОТИРОВАНИЕ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА АМг5

**А. А. Предко, И. Г. Олешук, А. Н. Моисеенко, И. Л. Поболь,  
М. Ю. Хома, Н. А. Кананович**

Физико-технический институт НАН Беларуси  
г. Минск, Республика Беларусь

Алюминий и его сплавы нашли широкое применение во многих отраслях промышленности (авиа- и ракетостроении, судостроении, в железнодорожном и автомобильном транспорте, нефтяной, химической и пищевой промышленности, при производстве посуды и др.). Изделия и конструкции из алюминия и его сплавов получаются более легкими (на 50 %), чем из стали. По широте использования сплавы алюминия удерживают второе место после стали и чугуна [1].

Перспективным методом повышения поверхностной твёрдости, износостойкости и коррозионных свойств алюминиевых сплавов является ионно-плазменное азотирование (ИПА). В Республике Беларусь проводятся исследования по ионному азотированию сталей, чугунов и титановых сплавов. Однако в литературе имеется ограниченная информация о методах инженерии поверхности алюминиевых сплавов с применением потоков ионов, электронов и плазмы, в том числе азотирования, для модификации их поверхности. Так, в [2] методом ИПА повышали твердость поверхностного слоя на сплаве А7 (аналоге сплава АД00 СНГ) до 1173 НV, что в 4,3 раза превышает твердость основного материала. В [3] приводятся данные о структуре и толщине диффузионного слоя при обработке сплава А999 (аналоге сплава СвА99) методом ИПА.

Целью настоящей работы был выбор технологических параметров процесса ИПА алюминиевого сплава АМг5, проведение металлографических, спектроскопических, микродюрOMETрических, рентгенофазовых исследований, а также трибологических испытаний упрочненных образцов.

Состав сплава АМг5 по ГОСТ 4784-97, мас. %: 4,8–5,8 магния; 0,3–0,8 марганца; до 0,5 железа; до 0,5 кремния; до 0,1 меди; 0,02–0,1 титана; до 0,005 бериллия. Размеры образцов для ИПА – диаметр 25 мм, толщина – 6 мм.

ИПА проводили в установке дверного типа с «холодными стенками» производства ФТИ НАН Беларуси. Для проведения исследования структуры и глубины азотированного слоя после ИПА изготавливали поперечные шлифы путем вырезания на автоматическом отрезном станке МЕТКОН с водным охлаждением места реза, что позволяет избежать перегрева материала. Для подготовки шлифов использовали пробоприготовительное оборудование Metkon – пресс Escopress 100 и шлифовально-полировальный станок Digiprep. Для травления

поверхности шлифов применяли раствор 0,5 мл HF; 2,5 мл HNO<sub>3</sub>; 1,5 мл HCl; 100 мл H<sub>2</sub>O.

Исследования структуры образцов проводили на оптическом микроскопе Planar MI-1 с CCD камерой и на растровом электронном микроскопе TESCAN MIRA3 с приставкой для микрорентгеноспектрального анализа. Микротвердость образцов измеряли на автоматическом моторизированном микротвердомере AFFRI-DM8. Измерения проводили при нагрузке 100 г с поверхности образцов и сравнивали с твердостью сердцевины. Для изучения глубины и элементного состава азотированных слоев использовали оптическую электронную спектроскопию в тлеющем разряде на приборе GDOES Profiler 2. Рентгеноструктурный анализ проводился на рентгеновском дифрактометре POWDIX 600 в монохроматизированном CoK $\alpha$ -излучении при напряжении 30 кВ и анодном токе 10 мА. Съёмки осуществляли в непрерывном режиме со скоростью 0,01 град/с. Для расшифровки фазового состава использовали картотеку PDF-2. Изучение трибологических характеристик образцов в исходном состоянии и после ИПА проводили на многофункциональном трибометре UNITEST-750 (DUCOM Instruments) по схеме «палец – диск» при следующих параметрах: палец (контртело) – шарик из стали ШХ15 диаметром 5,5 мм и твердостью 63 HRC, диск (образец сплава алюминия АМг5 до и после ИПА) – диаметр 25 мм, радиус дорожки трения 10 мм; нагрузка на образец 10 Н.

Процесс подготовки образцов из сплава АМг5 перед ионно-плазменным азотированием заключался в шлифовании, полировании и травлении с последующим осветлением поверхности непосредственно перед началом упрочняющей обработки. ИПА образцов осуществляли при температурах 450-500 °С, время выдержки при температуре азотирования составляло от 12 до 24 ч. ИПА проводили в среде азота, водорода и аргона в различном соотношении.

Микротвердость материала поверхности образцов в исходном состоянии составляла HV<sub>0,1</sub> 100. После ИПА поверхностная твердость возросла до HV<sub>0,1</sub> 135-164 в зависимости от режима обработки.

Изучение морфологии поверхности образца из сплава АМг5 на растровом электронном микроскопе показало, что после ИПА поверхность была неоднородной и имела направленную полосчатость с включениями агломератов (рисунок 1). Микрорентгеноспектральный анализ выявил наличие на поверхности азота в количестве 3,35 мас. %.

В соответствии со спектральным анализом толщина упрочненного слоя после ИПА составила около 800 нм (рисунок 2). На поверхности образца до глубины 300–400 нм наблюдалось значительное количество кислорода и азота. Это свидетельствует об образовании оксидов и нитридов алюминия, что подтверждается данными рентгенофазового анализа.

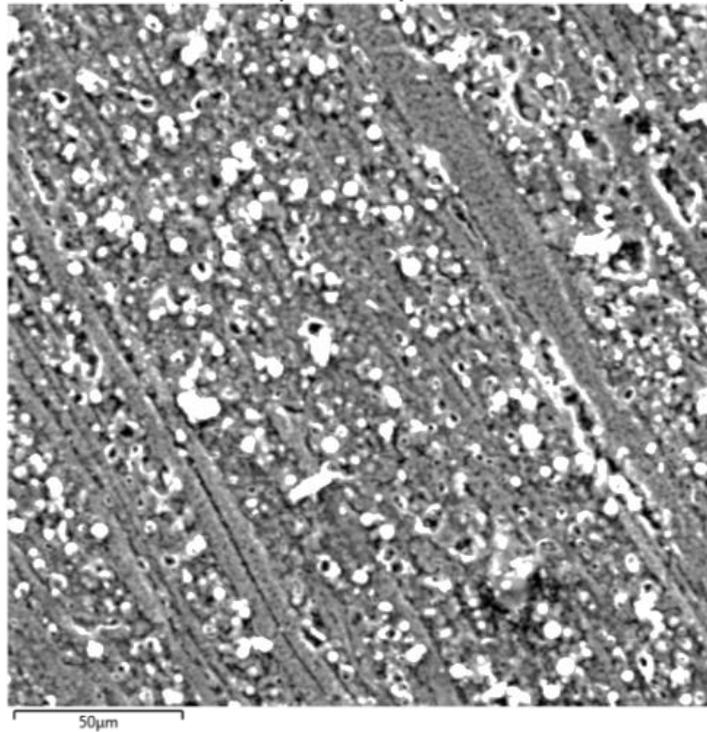


Рисунок 1 – Морфология поверхности образца из сплава АМг5 после ИПА

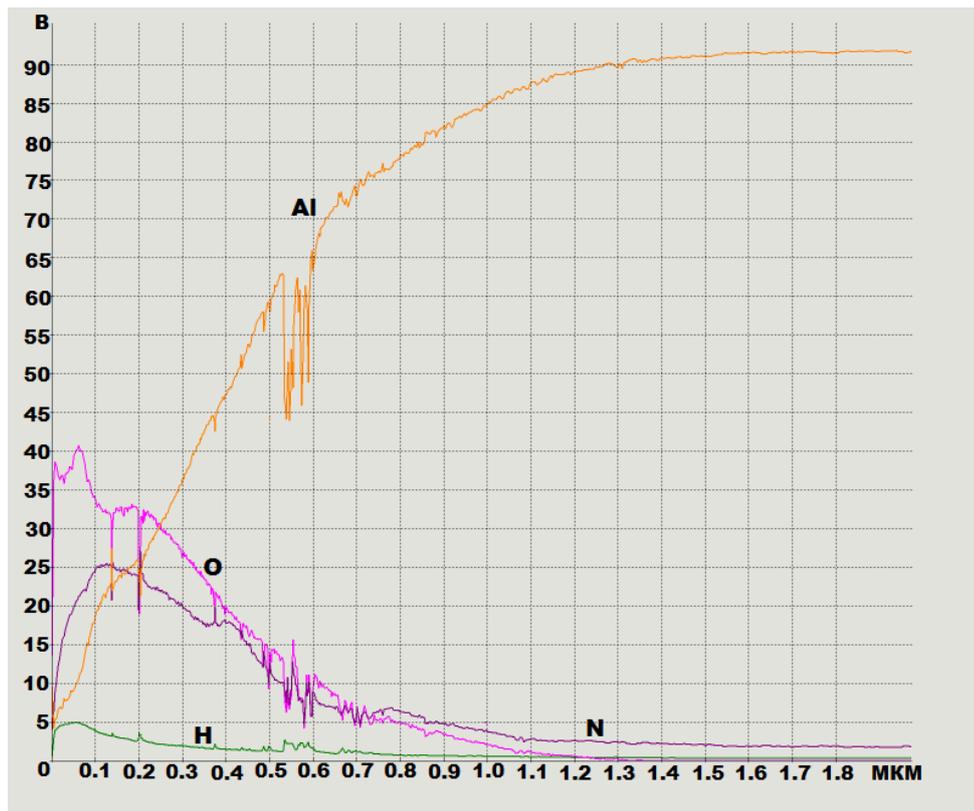
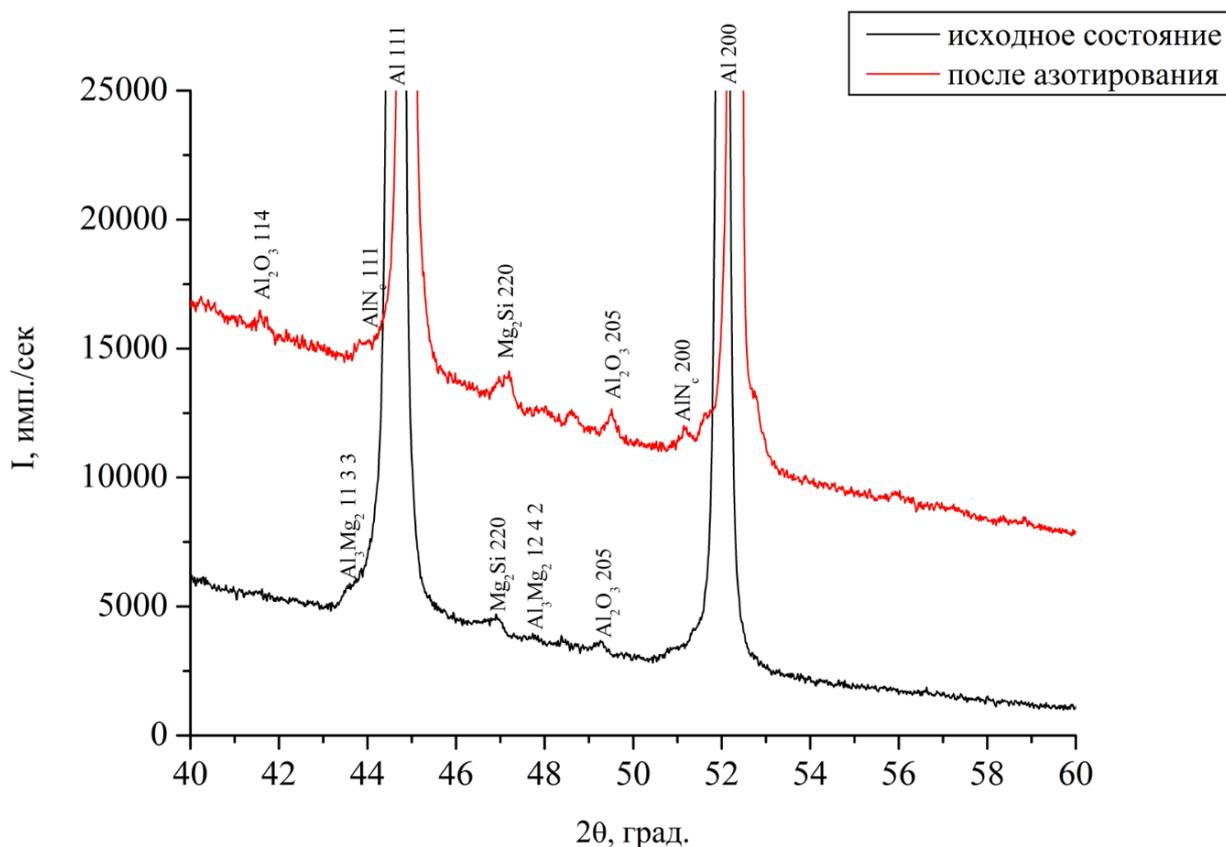


Рисунок 2 – Распределение химических элементов по глубине азотированного слоя на образце из сплава АМг5 после ИПА при температуре 450 °С и времени выдержки 12 ч

На рисунке 3 приведены фрагменты рентгеновских дифрактограмм, полученных на образцах из сплава АМг5. В исходном состоянии на поверхности об-

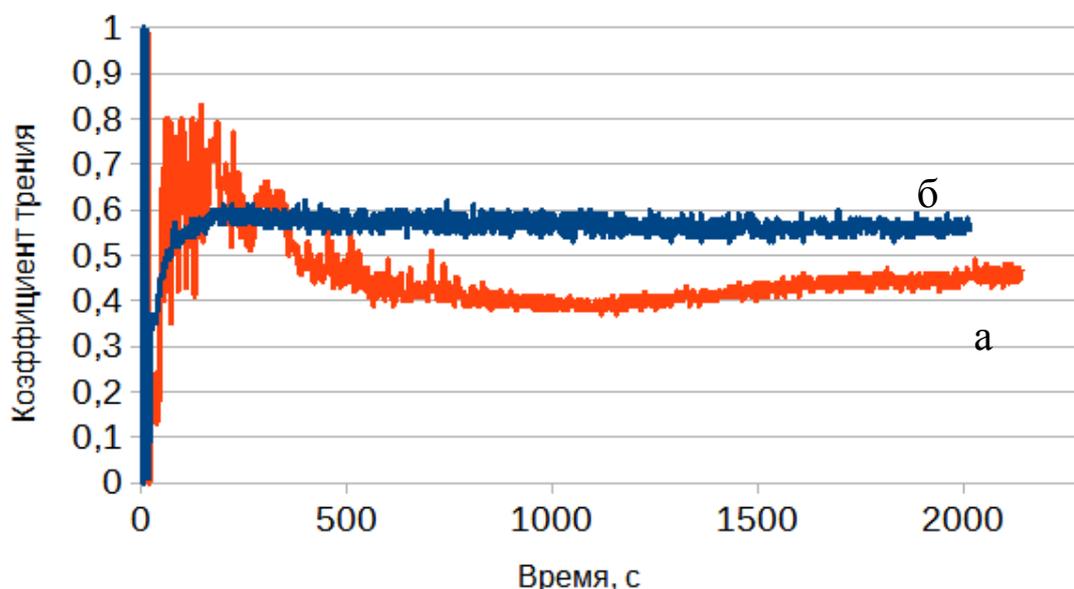
разца обнаружены фазы, соответствующие алюминию, оксиду алюминия  $Al_2O_3$  и соединениям магния  $Al_3Mg_2$  и  $Mg_2Si$ . После ИПА на образцах выявлены фазы Al и нитрида алюминия AlN. Определение фазового состава алюминиевых сплавов после ионной обработки осложняется тем, что пики Al и AlN практически совпадают. Атомы Al и N имеют малую рассеивающую способность, что приводит к низкой интенсивности пиков нитрида алюминия по сравнению с пиками Al, принадлежащими материалу основы. Кроме того, регистрируются линии  $Al_2O_3$  и  $Mg_2Si$  с низкой интенсивностью.



**Рисунок 3 – Фрагмент рентгеновской дифрактограммы образца из сплава АМг5 в исходном состоянии и после ИПА**

Трибологические испытания показали, что коэффициент трения образца в исходном состоянии составил 0,43 (рисунок 4а). На рисунке 4б представлена зависимость коэффициента трения от времени испытаний для образца из сплава АМг5 после ИПА при температуре 500 °С и времени выдержки 24 ч. Упрочненный слой через 180 с разрушился, а коэффициент трения в установившемся режиме составил 0,57.

По краям трибологической дорожки наблюдалось скопление частиц нитрида алюминия после истирания, что способствовало износу шарика. Твердость контртела из стали ШХ15 составляет  $HV_{0,1} 950$ , из чего можно сделать вывод, что поверхностная твердость нитридного слоя выше измеряемой микротвердомером с поверхности, и по табличным данным она достигает  $HV_{0,1} 1100$ .



**Рисунок 4 – Зависимость коэффициента трения от времени испытаний для образцов из алюминиевого сплава АМг5 в исходном состоянии (а) и после ИПА (б)**

Таким образом, при ИПА образцов из сплава АМг5 на поверхности образуется упрочненный слой с максимальной измеренной микротвердостью до  $HV_{0,1}$  164 толщиной до 800 нм, состоящий из Al, AlN, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и Mg<sub>2</sub>Si. Коэффициент трения образцов из сплава АМг5 увеличивался с 0,43 в исходном состоянии до 0,57 после ионно-плазменной обработки, что может быть связано с формированием трибологического слоя из продуктов трения упрочняющего слоя и контртела.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Интернет ресурс. Режим доступа: <https://naruservice.com/articles/sferaprimeneniya-alyuminiya> – свободный.
2. Крысина, О. В. Азотирование поверхности технически чистого алюминия в плазме несамостоятельного тлеющего разряда с полым катодом / О. В. Крысина [и др.] // Взаимодействие излучений с твердым телом: сб. статей. – Минск, 2017. – С. 250–252.
3. Sonnleitner, R., Microstructure of plasma nitrided layers on aluminium / R. Sonnleitner, K. Spiradek-Hahn, F. Rossi // Surface and Coatings Technology, 2002. – № 156. – P. 149–154.

## ВЛИЯНИЕ СЕПАРАЦИИ ПЛАЗМЫ НА СВОЙСТВА КАТОДНО-ДУГОВЫХ ПОКРЫТИЙ AlTiSiN

И. П. Акула Н. М. Чек,ан, М. Ю. Хома, С. Е. Сергеенко, Е. П. Шпак

Физико-технический институт НАН Беларуси,  
г. Минск, Республика Беларусь

### 1 Введение

Несмотря на достаточно хорошие перспективы и изученность наноконпозиционных покрытий соединений переходных металлов [1], таких как TiAlN, AlTiSiN, AlCrN, ZrCN и др., получаемых методом катодно-дугового осаждения, большой проблемой остается наличие макрочастиц (МЧ), так называемой «капельной фазы» в формируемых слоях и рост столбчатых структур, что существенно снижает эксплуатационные характеристики покрытий.

Макрочастицы представляют собой капли расплавленного металла мишени, возникающие из катодных пятен в результате высокого газодинамического давления в расплавленной микрованне в непосредственной близости от катодного пятна. Эти макрочастицы эжектируются в поток плазмы, а затем осаждаются на подложку вместе с растущим покрытием, что ухудшает его характеристики по трем основным аспектам:

- увеличение пористости покрытия в результате попадания некоторых капель на подложку вместе с нанесенным покрытием;
- размягчение покрытия из-за большой разницы в твердости материала покрытия и капель металла;
- повышение шероховатости поверхности, что критично для инструмента, применяемого для изготовления деталей с низкими допусками на размер.

Поэтому актуальной задачей является удаление МЧ в осаждаемых покрытиях. Ключевую роль в удалении МЧ играет электромагнитный фильтр плазменного потока [2], от степени совершенства которого зависят перспективы практического применения вакуумно-дугового осаждения покрытий. Успехами в разработке этих систем определяется прогресс в освоении новых технологий не только в производстве металлообрабатывающих инструментов, но и микроэлектронике, оптике, точной механике, которые во многом определяют ход технического развития общества.

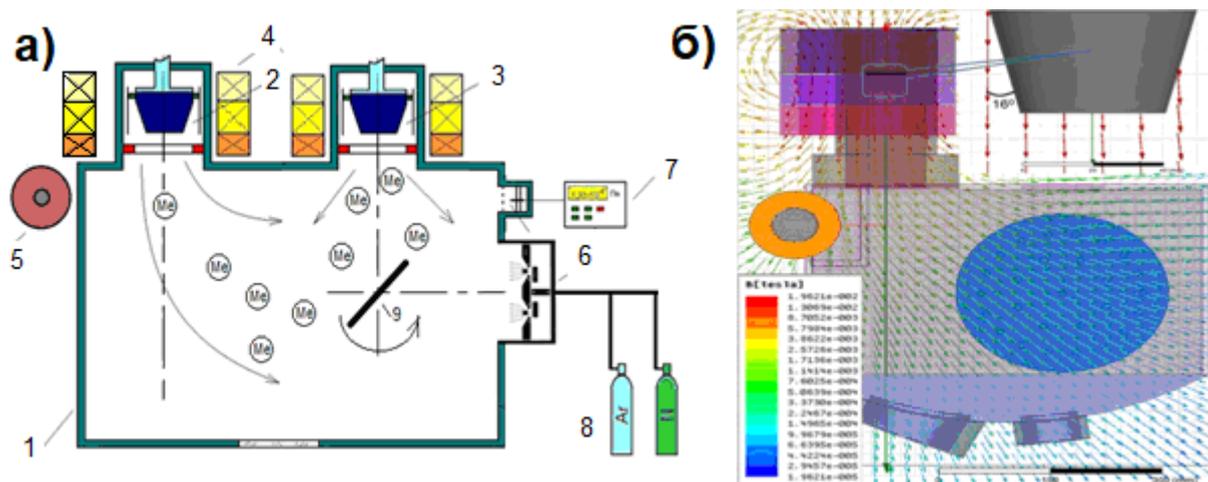
В настоящей работе приводятся результаты исследования влияния электромагнитной сепарации потока стационарной катодно-дуговой плазмы на состояние поверхности и механо-трибологические свойства композиционных покрытий AlTiSiN.

### 2 Методика эксперимента

Для экспериментов использовалась установка вакуумного нанесения покрытий УВНИПА-1-001 (рисунок 1а). На вакуумной камере, установлена конструкция конкоаксиальных (смещенных от осевой линии катода) электромагнитных катушек. Управление потоком плазмы осуществляется с помощью магнитного поля, создаваемого тремя катушками, размещенными вокруг катодно-

го узла, как схематически показано на рисунке 1а, а также двумя дополнительными катушками со стальными сердечниками (так называемые «дополнительные поворотные катушки»), размещенными соосно сбоку от источника плазмы. Их ось перпендикулярна оси блока из трех основных катушек. Особенностью дополнительных поворотных катушек является то, что они питаются электрическими токами, идущими в противоположных направлениях, то есть по часовой стрелке и против часовой стрелки, создавая одинаковые встречно направленные магнитные полюса в верхней части нижней катушки и в нижней части верхней катушки.

Для определения оптимальных параметров работы электромагнитных катушек моделировалась конфигурация магнитного поля с использованием специального программного обеспечения *ANSYS® Maxwell*. Моделирование проводилось через 20 итераций, что приводило к ошибке сходимости менее 1 %. В качестве граничных условий устанавливалось нулевое значение магнитного поля на расстоянии 100 см от центра катода. Влияние стенок вакуумной камеры из аустенитной стали 12Х18Н10Т на магнитное поле не учитывалось. Для моделирования поля, создаваемого дополнительной катушкой, учитывался стальной сердечник из стали 49К2ФА с магнитной проницаемостью 704. Структура наложенного магнитного поля в виде 2D-проекции представлена на рисунке 1б.



1 – вакуумная камера; 2 – источник сепарированного потока плазмы; 3 – источник несепарированного потока плазмы; 4 – электромагнитная система управления потоком плазмы; 5 – поворотные катушки; 6 – источник ионов; 7 – система управления вакуумом; 8 – технологические газы; 9 – подложка

**Рисунок 1 – Вакуумная установка УВНИПА-1-001 с источником несепарированного и сепарированного потока плазмы (а) и двухмерная конфигурация магнитного поля для сепарированного потока плазмы (б)**

В результате моделирования определено, что система катушек со следующими параметрами: ток стабилизирующей катушки 2,0 А, ток управляющей катушки 2,5 А, ток фокусирующей катушка 1,0 А, ток поворотных катушек 0,7 А, создает магнитное поле в конфигурации, подходящей для эффективного

непрямолинейного переноса плазмы из источника плазмы параллельно его оси, предотвращая контакт со стенками вакуумной камеры. Магнитное поле направляет плазму в область держателя подложки под углами от  $75^\circ$  до  $45^\circ$  для краев держателя подложки вблизи и вдали от источника плазмы соответственно.

Покрyтия AlTiSiN были получены с использованием мишени состава Al/Ti/Si – 60/30/10 ат.% в двух сериях экспериментов – в потоке сепарированной плазмы и в потоке несепарированной плазмы (таблица 1).

Таблица 1 – Условия получения покрытий AlTiSiN

№ серии – № эксп.	Ток дуги, А	Поток плазмы	Давление N <sub>2</sub> , Па×10 <sup>-3</sup>	U <sub>см</sub> , В	Примечание
1-1	55	сепарированный	5,6	-100	подложки: полиров. сталь Р6М5, полиров. кремний
1-2			7,5		
1-3			11		
1-4			15		
2-1		несепарированный	5,6		
2-2			7,5		
2-3			11		
2-4			15		

Покрyтия осаждались в течение 60 минут и 15 минут для сепарированного и несепарированного потока плазмы соответственно. Толщина покрyтия AlTiSiN, измеренная на микроинтерферометре МИИ-4, составила (0,5–1,1) мкм. Фазовый состав покрyтий определялся методами рентгеновского дифракционного анализа на дифрактометре GNR Explorer с K $\alpha$  излучением медного катода на длине волны  $\lambda = 0,154060$  нм в диапазоне углов сканирования  $2\theta$  ( $10-100$ ) $^\circ$ . Твердость покрyтий определялась методом индентирования на микротвердомере Struers Duramin 5 при нагрузке 25 г на алмазный наконечник Кнупа. Трибологические характеристики исследовались на трибометре, работающем по схеме «палец – плоскость диска» при следующих параметрах: палец (контртелo) – шарик из стали ШХ15 диаметром 5,5 мм и твердостью 63 HRC; диск (образец с покрyтием) – диаметр 25 мм, радиус дорожки трения 10 мм; нагрузка на образец 1 Н; частота вращения диска – 80 об/мин при температуре окружающей среды 23,5  $^\circ$ C и относительной влажности 50 %. Состояние поверхности осажденных покрyтий AlTiSiN на предмет присутствия дефектов в виде капельной фазы из потока стационарной металлической плазмы, распространяющейся в условиях прямой видимости поверхности катода и электромагнитной сепарации, искривляющей траекторию ее движения, исследовали с помощью оптической микроскопии на инструментальном микроскопе "ПЛАНАР" при увеличении 1000 $\times$ . Дефектность поверхности определялась путем подсчета капель с размерами от субмикронных до  $>5$  мкм на площади 120 $\times$ 80 мкм.

### 3 Результаты

На рисунке 2 представлены результаты исследования влияния давления азота на скорость осаждения покрытий AlTiSiN. Можно видеть, что скорость осаждения покрытия из несепарированного и сепарированного потоков плазмы отличается в (4–6) раз. При этом рост давления азота до  $1,1 \times 10^{-2}$  Па в вакуумной камере приводит к увеличению скорости осаждения AlTiSiN из сепарированной плазмы более чем в 1,5 раза – с 0,55 мкм/ч до 1,0 мкм/ч. Дальнейшее повышение давления в реакционной области приводит к снижению скорости осаждения покрытия до 0,9 мкм/ч. Вероятно, это связано с тем, что более низ-

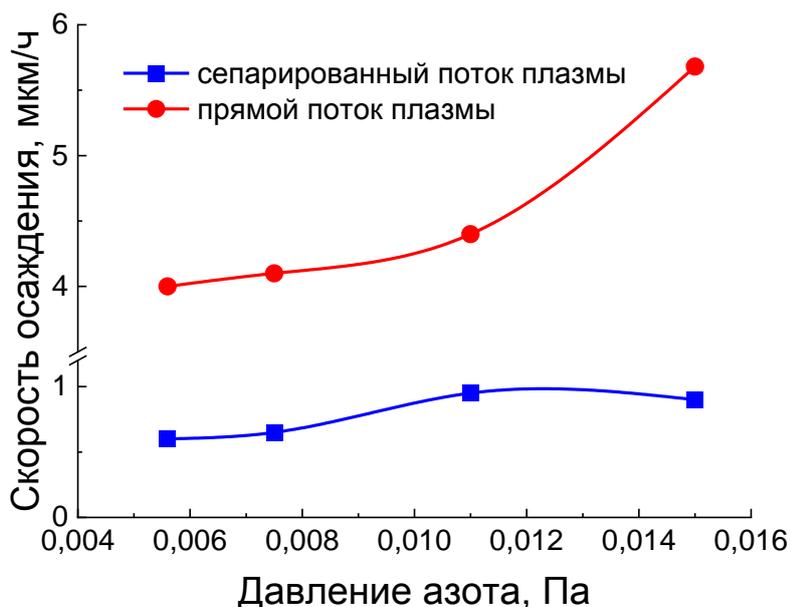


Рисунок 2 – Скорость роста покрытия AlTiSiN

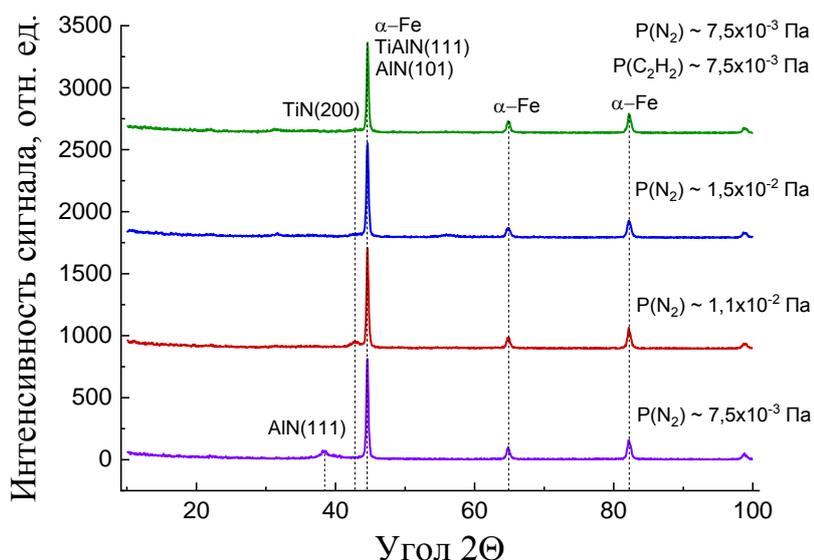


Рисунок 3 – Фазовый состав покрытия AlTiSiN

ственно более коротким путем транспорта ионов и уменьшением эффекта рассеяния на соударениях ионов плазмы.

коэнергетические ионы сепарированного потока металлической плазмы в результате повышения давления газа выше определенного значения начинают испытывать многочисленные столкновения с молекулами окружающей среды. Это в свою очередь приводит к рассеянию и потере энергии ионов плазменного потока. В результате снижается вероятность образования конденсата на ростовой поверхности. Для несепарированного потока плазмы наблюдается обратный эффект – когда рост давления азота приводит к увеличению скорости осаждения AlTiSiN покрытия. При этом при давлении газа менее  $1,1 \times 10^{-2}$  Па скорость роста покрытия увеличивается незначительно с 4 мкм/ч до 4,4 мкм/ч. Повышение давления азота до  $1,5 \times 10^{-2}$  Па приводит к росту скорости осаждения покрытия до 5,6 мкм/ч. Вероятно, это связано с суще-

На рисунке 3 представлены результаты исследования фазового состава покрытий AlTiSiN, полученных из сепарированного потока плазмы на стали Р6М5. Дифрактограммы демонстрируют пики при  $44,55^\circ$ ;  $64,78^\circ$  и  $82,12^\circ$ , которые соответствуют различным состояниям кристаллической решетки  $\alpha$ -Fe (основа). Непосредственно с покрытием могут быть сопоставлены пики при  $38,30^\circ$  и  $42,77^\circ$ , которые соответствуют фазам AlN (111) и TiN (200). Низкая интенсивность пиков от покрытия связана с его малой толщиной.

В то же время по литературным данным [1] в нанокompозитных пленках TiAlSiN формируется двухфазная структура в виде фазы ГЦК (Ti,Al)N типа B1-NaCl и фазы аморфного нитрида кремния ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ). Небольшое количество кремния в пленках  $\text{Ti}_{1-x-y}\text{Al}_x\text{Si}_y\text{N}$  улучшает твердость ГЦК (Ti,Al)N, поскольку способствует снижению размера кристаллитов, препятствуя росту кристаллизации (Ti,Al)N для достижения сильного измельчения зерна и высокой плотности границ зерен [3]. Однако дополнительно поступающий в растущую пленку кремний приводит к снижению твердости формируемого конденсата, поскольку появляется избыток сравнительно мягкой фазы аморфного  $\text{Si}_3\text{N}_4$  между нанокристаллитами [1], что препятствует кристаллографической когерентности и когерентным напряжениям решетки [4]. Структура пленок TiAlSiN также сильно зависит от состава пленки. Формирование твердых растворов замещения титана алюминием и кремнием приводит к локальным деформациям кристаллической решетки, что препятствует движению дислокаций под нагрузкой и тем самым способствует повышению твердости покрытий. Однако избыточное добавление Al и Si снижает твердость пленки. В работе [5] отмечается, что когда атомное отношение (Al+Si)/Ti достигает примерно 0,8, происходит фазовое разделение на две кубические фазы  $\text{Ti}_{1-x}\text{Al}_x\text{N}$  типа NaCl и типа цинковой обманки AlN, вследствие чего твердость композита падает. При еще более высоком отношении (Al+Si)/Ti, равном 1,3, начинает формироваться гексагональная фаза AlN типа вюрцита, при этом твердость уже не снижается. Расслоению фазы AlN способствует увеличение толщины нанослоев нитрида с высоким содержанием (Al+Si) [5]. По результатам рентгеноструктурных исследований содержание нитрида титана не менее 0,39 необходимо для сохранения однофазной кубической структуры типа TiN.

Анализ состояния поверхности полученных покрытий показал, что магнитная сепарация потока плазмы является эффективным инструментом сокращения количества микрокапель, как в этом можно убедиться из сравнения морфологии поверхности покрытий, полученных из сепарированной и несепарированной плазмы (рисунок 4). На поверхности покрытий, полученных из не сепарированного потока плазмы, часто встречаются агломерации капель различных размеров. В тоже время следует отметить, что сепарация не позволяет полностью избавиться от присутствия дефектов на поверхности покрытия AlTiSiN.

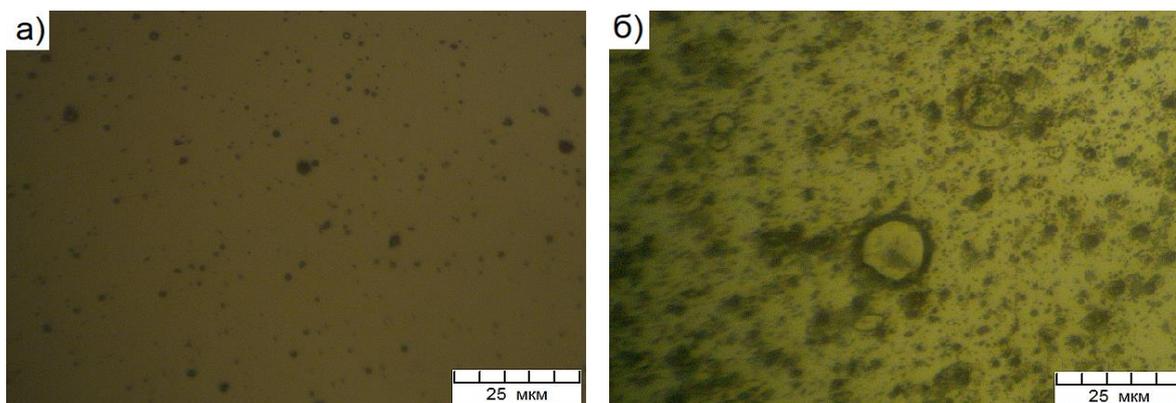


Рисунок 4 – Поверхность покрытия AlTiSiN из сепарированного (а) и несепарированного (б) потока плазмы

Вероятно, это связано с тем, что мишень является не литой, а изготовлена путем прессования порошкового материала, который в процессе горения дуги может уходить с поверхности катода в виде кластеров зерен. Кроме того, алюминий, входящий в состав катода, имеет низкую температуру плавления  $660\text{ }^{\circ}\text{C}$  и до испарения при температуре  $2470\text{ }^{\circ}\text{C}$  достаточно длительное время находится в катодной ванне в жидком состоянии. В это время алюминий может увлекаться катодной дугой в поток плазмы в виде нейтральных капель, которые, переотражаясь от стенок полого анода и вакуумной камеры, попадают на подложку.

На рисунке 5 представлена информация о влиянии условий осаждения покрытий AlTiSiN на плотность расположения и размер капель, попадающих на поверхность подложки. Сепарация плазмы позволяет существенно, на порядок, снизить общее число капель на поверхности AlTiSiN. Основную долю как в не сепарированном, так и в сепарированном потоке составляют капли с размером менее 1 мкм. Также в сепарированных покрытиях на контролируемой области  $120 \times 80$  мкм полностью отсутствуют дефекты с размерами более 5 мкм, а число дефектов с размерами (3–5) мкм не превышает 6.

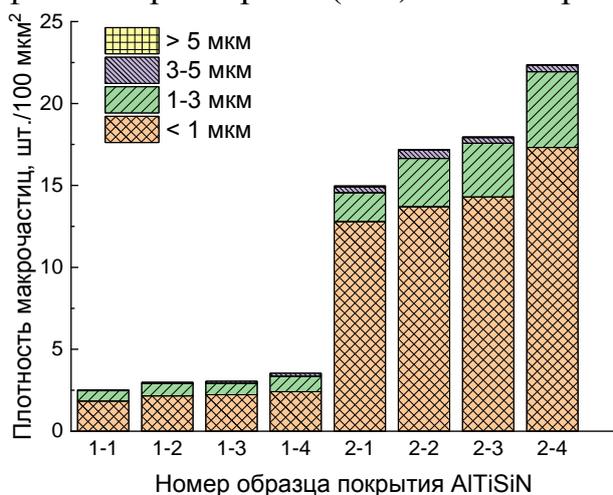


Рисунок 5 – Влияние сепарации плазмы на дефектность покрытия AlTiSiN

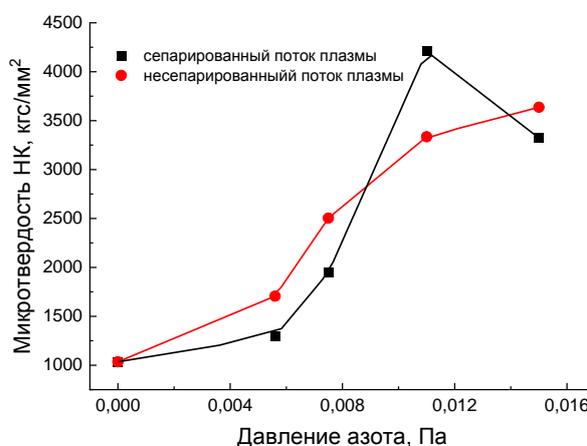


Рисунок 6 – Влияние давления азота на твердость покрытия AlTiSiN

Результаты исследований демонстрируют, что рост давления азота приводит к увеличению твердости покрытий AlTiSiN, полученных как из сепарированного, так и не сепарированного потока плазмы катодно-дугового разряда (рисунок 6). Стоит обратить внимание на тот факт, что максимальная твердость, достигающая порядка НК 4200 кгс/мм<sup>2</sup>, измерена для образца покрытия AlTiSiN № 1–3, полученного из сепарированного потока плазмы при давлении азота около  $1,1 \times 10^{-2}$  Па.

При большем давлении реакционного газа твердость сепарированных покрытий начинает снижаться в отличие от покрытий AlTiSiN из не сепарированного потока плазмы. Вероятно, это связано с более длинной траекторией движения заряженных частиц в сепарированном плазменном потоке, что в свою очередь приводит к энергетическим потерям при увеличении вероятности столкновения ионов с возросшим числом молекул азота при росте его давления в вакуумной камере. Снижение энергии ионов прекурсора уменьшает вероятность образования нитридных соединений непосредственно на поверхности основы.

Характерные особенности процесса трения для покрытия AlTiSiN, полученного при давлении азота  $1,5 \times 10^{-2}$  Па как в несепарированном, так и в сепарированном потоке плазмы, представлены на рисунке 7. Почти для всех образцов покрытия AlTiSiN наблюдается достаточно высокое значение устоявшегося коэффициента трения. После кратковременной притирки и удаления естественного оксидного слоя поверхности контртела в течение первых (3–5) минут коэффициент трения начинает медленно, практически линейно, возрастать от 0,45 и в дальнейшем стабилизируется на уровне 0,85 – 0,95. Ближе к окончанию испытаний на графике трения для покрытия, полученного из сепарированного потока плазмы, наблюдаются флуктуации значе-

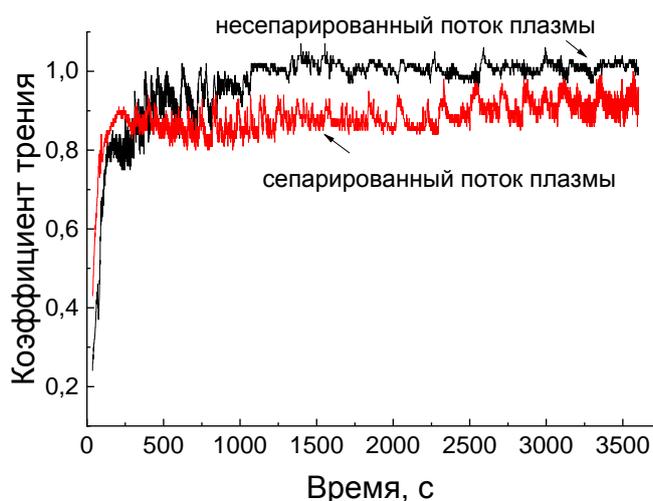


Рисунок 7 – Коэффициент трения покрытия AlTiSiN

ния коэффициента трения с возрастающей амплитудой, что является характерным для случая попадания отслоившихся частиц покрытия в зону трения в результате усталостного изнашивания покрытия при длительной циклической нагрузке. Также из-за твердости покрытия значительно выше твердости контртела из стали ШХ15 наблюдается его повышенный износ с увеличением площади контакта трущихся тел и появлением продуктов износа. Их наличие в треке износа приводит к абразивному изнашиванию трущихся тел, а их удаление к появлению флуктуаций на графике трения.

ближе к окончанию испытаний на графике трения для покрытия, полученного из сепарированного потока плазмы, наблюдаются флуктуации значе-

## **Заключение**

Проведенные исследования показали, что электромагнитная сепарация стационарной плазмы существенно влияет как на состояние поверхности осаждаемых покрытий, так и на их свойства. Показано, что количество капель на поверхности покрытия AlTiSiN, полученного из сепарированной плазмы многократно ниже, чем для покрытий, сформированных в несепарированном потоке плазмы. Сепарированные покрытия демонстрируют максимальную твердость на уровне НК 3500–4000 и более низкий коэффициент трения по сравнению с покрытиями из не сепарированного потока плазмы. При этом морфология поверхности покрытий несильно сказывается на этом параметре.

## **СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Veprek, S., Reiprich. S. A concept for the design of novel superhard coatings / S. Veprek, S. Reiprich. // *Thin Solid Films*. – 1995. – Vol. 268, Is. 1–2. – P. 64–71.
2. Comparison of filtered high-current pulsed arc deposition ( $\phi$ -HCA) with conventional vacuum arc methods/ T. Witke [at al.] // *Surface and Coatings Technology*. – 2000. – Vol. 126. – P. 81–88.
3. Microstructure of (Ti,Si,Al)N nanocomposite coatings / S. Carvalho [at al.] // *Surface and Coatings Technology*. – 2004. – Vol. 177–178. – P. 369–375.
4. Microstructure and hardness of nanocrystalline  $Ti_{1-x-y}Al_xSi_yN$  thin films Materials / D. Rafaja [at al.] // *Science and Engineering: A*. – 2007. – Vol. 462, Is. 1–2. – P. 279–282.
5. Morstein. Characterization of thermally treated TiAlSiN coatings by TEM and nanoindentation / M. Parlinska-Wojtan [at al.] // *Surface and Coatings Technology*. 2004. – Vol. 188–189. – P. 344–350.

УДК 519.85

## **ТОПОЛОГИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ УСТРОЙСТВ СТАЦИОНАРНОГО НАГРЕВА**

**Глебов А.О.**

Тамбовский государственный технический университет,  
г. Тамбов, Российская Федерация

В настоящее время методы топологической оптимизации (ТО) находят широкое применение в различных предметных областях благодаря быстрому развитию вычислительной техники и прикладного программного обеспечения. На этапе поиска структуры (топологии) объекта методы параметрической оптимизации показывают низкую эффективность из-за сложности формализации задачи и трудоемкого вычисления градиента целевой функции, в то время как методы ТО позволяют приблизиться к наилучшему распределению материала в заданной области за приемлемое время.

За три последних десятилетия разработано более десятка методов ТО, однако наибольшее распространение получили дискретные методы (ESO - Evolutionary Structural Optimization и BESO – Bi-directional Evolutionary Structural Optimization) и непрерывные, основанные на модели материала SIMP [1,2]. Изначально эти методы разрабатывались для оптимизации конструкций, испытывающих механические нагрузки, по критерию механической податливости. Современные исследования направлены на расширение области применения ТО. Например, во многих предметных областях (вулканизация резинотехнических изделий, термообработка металлических деталей, отверждение композитов и т.д.) ставится задача обеспечения требуемых температурных полей или минимизации температурных перепадов. При этом в классической постановке задачи, в том числе в большинстве коммерческих систем конечно-элементного анализа, ТО осуществляется по критерию тепловой податливости:

$$\Theta = \int_{\Omega} q \operatorname{grad} T d\Omega, \quad (1)$$

где  $q$  – тепловой поток, Вт/м<sup>2</sup>;  $T$  – температура, °С;  $\Omega$  – расчетная область.

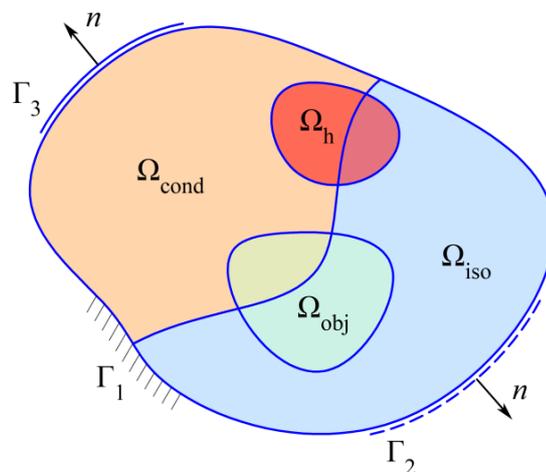
Оптимизация по данному критерию лишь в редких случаях находит практическое применение. Более актуальны задачи ТО по температурным критериям. Приведем в качестве примера постановку задачи ТО по критерию разности между максимальной и минимальной температурами в целевой области.

Рассмотрим тело произвольной формы, состоящее из двух непересекающихся областей  $\Omega_{\text{cond}}$  и  $\Omega_{\text{iso}}$  с коэффициентами теплопроводности  $\lambda_{\text{cond}}$  и  $\lambda_{\text{iso}}$  соответственно (см. рисунок 1). При этом полагаем, что  $\lambda_{\text{cond}} \gg \lambda_{\text{iso}}$ .

Процесс стационарной теплопроводности рассматриваемого тела описывается следующим дифференциальным уравнением:

$$\lambda \operatorname{div} \operatorname{grad} T + Q = 0, \quad (2)$$

где  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности, Вт·м<sup>-1</sup>·К<sup>-1</sup>;  
 $Q$  – удельное тепловыделение, Вт/м<sup>3</sup>.



**Рисунок 1 – Объект топологической оптимизации**

На внешних поверхностях тела  $\Gamma_1$ ,  $\Gamma_2$  и  $\Gamma_3$  заданы граничные условия 1, 2 и 3 рода соответственно.

$$T|_{\Gamma_1} = T_0; \quad (3)$$

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{\Gamma_2} = q_0; \quad (4)$$

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{\Gamma_3} = \beta(T - T_{\text{amb}}), \quad (5)$$

Существует также область  $\Omega_h$ , где задано удельное тепловыделение интенсивностью  $Q_0$ , Вт/м<sup>3</sup>.

На границе областей  $\Omega_{\text{cond}}$  и  $\Omega_{\text{iso}}$  обеспечивается идеальный тепловой контакт:

$$\lambda_{\text{cond}} \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{\Omega_{\text{cond}}} = \lambda_{\text{iso}} \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{\Omega_{\text{iso}}}; \quad T|_{\Omega_{\text{cond}}} = T|_{\Omega_{\text{iso}}}. \quad (6)$$

В объеме рассматриваемого тела задана целевая область  $\Omega_{\text{obj}}$ , где необходимо обеспечить равномерное температурное поле.

Постановка задачи топологической оптимизации в этом случае формулируется следующим образом. Необходимо найти такое геометрическое место точек, определяющих область  $\Omega_{\text{cond}}$ , чтобы разность между максимальной  $T_{\text{max}}^{\text{obj}}$  и минимальной  $T_{\text{min}}^{\text{obj}}$  температурами целевой области  $\Omega_{\text{obj}}$  достигала минимального значения при выполнении условий (2)-(6):

$$\Delta T^{\text{obj}} = T_{\text{max}}^{\text{obj}} - T_{\text{min}}^{\text{obj}} \rightarrow \min, \quad (7)$$

Для решения уравнения (2) будем использовать метод конечных элементов (МКЭ), реализуемый системой ANSYS. Запишем это уравнение в дискретном виде:

$$\mathbf{CT} = \mathbf{Q}, \quad (8)$$

где  $\mathbf{C}$  – глобальная матрица теплопроводности;  $\mathbf{T}$  – глобальный вектор узловых температур;  $\mathbf{Q}$  – глобальный вектор тепловой нагрузки.

Для решения поставленной задачи предлагается использовать метод эволюционной ТО, идея которого заключается в постепенном «удалении» неэффективного материала. Оценка эффективности основана на расчете чувствительности целевой функции к дискретному изменению свойств материала конечных элементов (КЭ).

В работе [3] описан метод эволюционной ТО устройств стационарного нагрева, основанный на решении системы уравнений (8) с вектором фиктивной тепловой нагрузки  $\mathbf{Q}_f$ :

$$\mathbf{CT}_f = \mathbf{Q}_f. \quad (9)$$

Согласно этому методу чувствительность целевой функции к дискретному изменению теплопроводности  $e$ -го КЭ (перехода КЭ из области  $\Omega_{\text{cond}}$  в область  $\Omega_{\text{iso}}$ ) можно приближенно определить по формуле

$$\alpha^e \approx \mathbf{T}_f^{eT} \mathbf{C}^e \mathbf{T}^e, \quad (10)$$

где  $\mathbf{C}^e$  – локальная матрица теплопроводности  $e$ -го КЭ;  $\mathbf{T}^e$  – локальный вектор действительных узловых температур  $e$ -го КЭ;  $\mathbf{T}_f^e$  – локальный вектор фиктивных узловых температур  $e$ -го КЭ.

Компоненты вектора  $\mathbf{Q}_f$  можно рассматривать как весовые коэффициенты [4]. Положительное значение коэффициента способствует минимизации температуры в соответствующем узле, отрицательное – максимизации. Предлагается использовать степенную функцию распределения весовых коэффициентов:

$$\forall(k \in N_{\text{obj}}) \Rightarrow Q_f^k = \left( \frac{2(T_k - T_{\text{avg}})}{\Delta T^{\text{obj}}} \right)^b, \quad (11)$$

где  $N_{\text{obj}}$  – множество номеров узлов целевой области  $\Omega_{\text{obj}}$ ;  $T_k$  – температура узла под номером  $k$ , °С;  $T_{\text{avg}}$  – средняя температура целевой области, °С;  $b$  – нечетное натуральное число.

Описанный метод является достаточно гибким, для выбора другой целевой функции достаточно изменить способ формирования вектора фиктивной тепловой нагрузки. Например, при минимизации максимального отклонения температуры от заданного значения  $T_{\text{set}}$  расчет вектора осуществляется следующим образом:

$$\forall(k \in N_{\text{obj}}) \Rightarrow Q_f^k = (T_k - T_{\text{set}})^b, \quad (12)$$

Минимизация средней температуры может быть осуществлена путем снижения температуры в каждом узле целевой области. При этом наибольшее внимание следует уделять областям высокой температуры:

$$\forall(k \in N_{\text{obj}}) \Rightarrow Q_f^k = \left( \frac{T_k - T_{\text{min}}^{\text{obj}}}{\Delta T^{\text{obj}}} \right)^b. \quad (13)$$

Поскольку разность  $(T_k - T_{\text{min}}^{\text{obj}})$  всегда неотрицательна, то показатель  $b$  в данном случае может принимать четные значения.

Алгоритм ТО методом ESO сводится к следующим действиям:

- 1) формирование расчетной области (построение сетки КЭ, задание нагрузок и граничных условий);
- 2) расчет температурного поля по уравнению (8);
- 3) расчет вектора весовых коэффициентов  $\mathbf{Q}_f$  для узлов целевой области  $\Omega_{\text{obj}}$ ;
- 4) решение системы уравнений (9) с фиктивной нагрузкой  $\mathbf{Q}_f$ ;
- 5) расчет значений  $\alpha^e$  для каждого КЭ по формуле (10);
- 6) выбор КЭ с минимальными значениями  $\alpha^e$  с учетом ограничения на скорость эволюции;
- 7) изменение теплопроводности выбранных КЭ на  $\lambda_{\text{iso}}$ .

Пункты 2-7 повторяются циклически до достижения оптимального решения, когда для всех КЭ выполняется  $\alpha^e \geq 0$ .

Для тестирования предложенного метода рассмотрим в двумерной постановке задачу ТО квадратной пластины по критерию разности температур в целевой области. Сторона пластины составляет 100 мм, на левой и верхней границах которой задана нулевая температура (см. рисунок 2):

$$T(0; y) = T(x; 0, 1) = 0 \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (14)$$

На нижнюю и правую границы действует тепловой поток:

$$q_y(x; 0) = q_x(0, 1; y) = 10^3 \text{ Вт/м}^2. \quad (15)$$

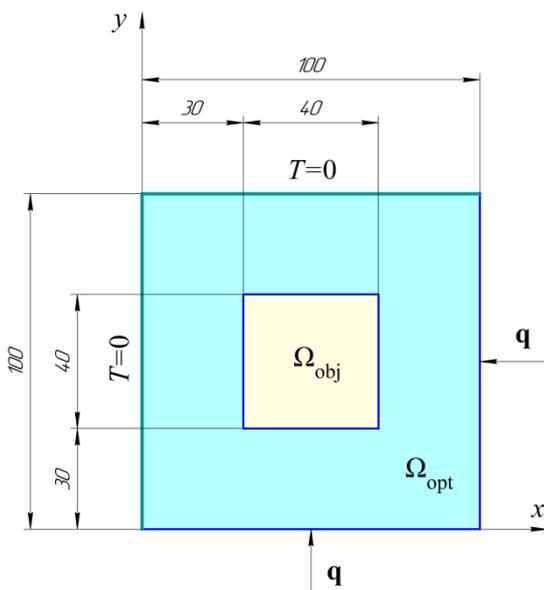


Рисунок 2 – Расчетная схема

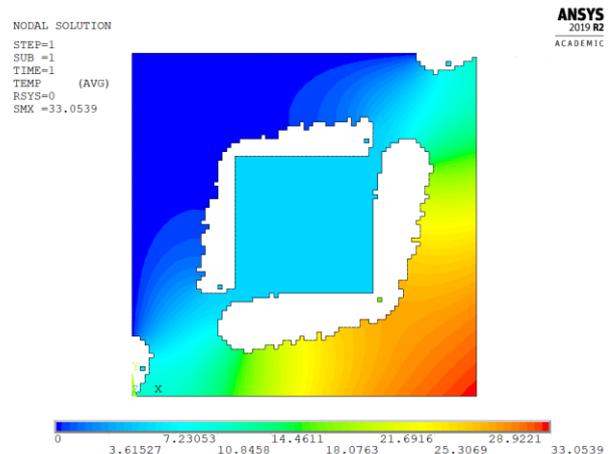
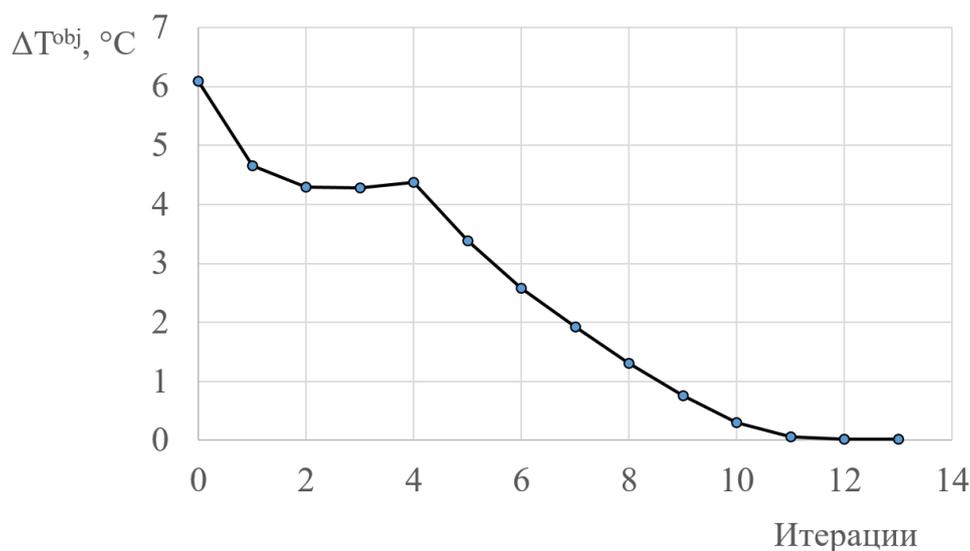


Рисунок 3 – Результат оптимизации

Целевая область  $\Omega_{obj}$  представляет собой квадрат размером 40 мм, расположенный по центру пластины. В данной задаче вводится также область  $\Omega_{opt}$ , за пределами которой оптимизация не проводится. В общем случае геометрия области  $\Omega_{opt}$  может быть произвольной, но по условию рассматриваемой задачи целевая область не пересекается с областью оптимизации:  $\Omega_{obj} \cap \Omega_{opt} = \emptyset$ . Таким образом, в центре пластины зафиксирована область высокой теплопроводности.

Коэффициенты теплопроводности составляют:  $\lambda_{cond} = 10 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-1}\text{K}^{-1}$ ,  $\lambda_{iso} = 10^{-3} \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-1}\text{K}^{-1}$ . При таком низком значении теплопроводности  $\lambda_{iso}$  область  $\Omega_{iso}$  можно интерпретировать как отсутствие материала. Расчетная область аппроксимирована регулярной сеткой  $80 \times 80$  КЭ PLANE55 системы ANSYS. Использовалась линейная функция (11) распределения весовых коэффициентов ( $b = 1$ ).



**Рисунок 4 – График сходимости целевой функции**

Температурное поле оптимизированной пластины представлено на рисунке 3, где область  $\Omega_{\text{iso}}$  не показана. График сходимости целевой функции приведен на рисунке 4. Как видно из представленных результатов, максимальную разность температур в целевой области удалось снизить с 6,09 °C до 0,02 °C за 13 итераций, что подтверждает эффективность предложенного метода.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Tyflopoulos, E. State of the art of generative design and topology optimization and potential research needs / E. Tyflopoulos, D.T. Flem, M. Steinert, A. Olsen // Proc. Nord. Des. Era Digit. Nord. 2018. P. 1–15.
2. Wang, C. A comprehensive review of educational articles on structural and multidisciplinary optimization / C. Wang, Z. Zhao, M. Zhou, O. Sigmund, X.S. Zhang // Structural and Multidisciplinary Optimization. Springer Berlin Heidelberg, 2021. Vol. 64, № 5. 2827–2880 p.
3. Li, Q. Evolutionary topology optimization for temperature reduction of heat conducting fields / Q. Li, G.P. Steven, Y.M. Xie, O.M. Querin // Int. J. Heat Mass Transf. 2004. Vol. 47, № 23. P. 5071–5083.
4. Glebov, A.O. Designing Devices for Uniform Steady-State Heating with the Method of Evolutionary Structural Optimization / A.O. Glebov, S.V. Karpushkin, E.N. Malygin // J. Eng. Phys. Thermophys. 2022. Vol. 95, № 6. P. 1393–1405.

## СОДЕРЖАНИЕ

### УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ, АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА, ПРОМЫШЛЕННАЯ РОБОТОТЕХНИКА

<b>Прокопеня О.Н., Терещук Г.В., Лапука А.С., Пикула А.И.</b> НАБЛЮДАТЕЛЬ СОСТОЯНИЯ В ПРИВОДЕ РОБОТА.....	4
<b>Тарасевич М. Д., Василюк Е.В.</b> АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ МАШИНОЙ ДЛЯ ОТЖИМА ВОДЫ ИЗ ИЛА.....	10
<b>Вабищевич Л.И., Ярошевич А.В.</b> СХЕМА КОМПЕНСАТОРА РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ БЫТОВЫХ НАГРУЗОК .....	14
<b>Кохнюк В. Н., Дробов А. Н., Паршута А. А., Смягликов И. П., Багаев С. И., Изюмов А. А.</b> СТЕНД ДЛЯ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ ИЗ ЛИТИЙ-ИОННЫХ АККУМУЛЯТОРОВ .....	19
<b>Джумаев А. Я.</b> ПИЛОТНЫЙ ПРОЕКТ ПРОИЗВОДСТВА ВОДОРОДА НА ТЕРРИТОРИИ ТУРКМЕНИСТНА .....	23
<b>Дубатовка В. В., Кудан Т. А., Филон Д. А.</b> РОБОТИЗИРОВАННАЯ МОБИЛЬНАЯ СИСТЕМА СОРТИРОВКИ ЦВЕТНЫХ ОБЪЕКТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИСТЕМЫ КОМПЬЮТЕР- НОГО ЗРЕНИЯ .....	30
<b>Кудрицкий Я. В., Левданский А. М., Ялковский Н. С.</b> ОСОБЕННОСТИ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХ- НОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В МАШИНОСТРОЕНИИ.....	34
<b>Матрунчик Ю. Н., Красько Е. Г.</b> РОБОТИЗИРОВАННАЯ МОБИЛЬНАЯ СИСТЕМА ЗДОРОВОГО СНА И ПРОБУЖДЕНИЯ.....	39
<b>Мисякова В. А., Ковалева И. Л.</b> ОБОСНОВАНИЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НЕЙРОННОЙ СЕТИ YOLO ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОЛОЖЕНИЯ РАБОЧЕГО ИНСТРУМЕНТА 3D-ПРИНТЕРА .....	45

**Сазонникова Н.А., Илюхин В.Н., Петров И.Н., Косов Г.А., Азизов М.Э.**  
ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОГО  
ЦЕНТРА РОБОТА-МАНИПУЛЯТОРА В ПРОЦЕССЕ ИНКРЕМЕНТАЛЬНОГО  
ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ..... 49

**НАДЕЖНОСТЬ, ДИАГНОСТИКА  
И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИЙ МАШИН.  
ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ**

**Горбунов В.П., Тюшкевич В.В.**  
ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВА-  
НИЯ НА СТАДИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ..... 56

**Акулич Я. А.**  
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПАР ТРЕНИЯ В ПРОЦЕССЕ ФОР-  
МИРОВАНИЯ РАВНОВЕСНОЙ ШЕРОХОВАТОСТИ..... 61

**Барсуков В. Г., Воропаев В. В., Воропаева Е. Т., В. М. Голуб**  
СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МОДЕЛЕЙ ВЗАИМОСВЯЗИ КОЭФФИЦИЕН-  
ТОВ ТРЕНИЯ ЗИБЕЛЯ И КУЛОНА..... 65

**Голуб В. М., Теслюк Д. В., Колодич В. В., Добрияник Ю.А., Мартынов А.В.**  
ДИАГНОСТИКА СТАРЕНИЯ МОТОРНЫХ МАСЕЛ С ПОМОЩЬЮ КА-  
ПЕЛЬНОГО ТЕСТА (МЕТОД VLOTTER SPOT) ..... 69

**В. П. Иванов, Т. В. Вигерина, С. В. Пилипенко, А. В. Дудан, В. В. Кострицкий**  
ОБОСНОВАНИЕ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ПРИРЕМОНТЕ АГРЕГАТОВ...74

**Литвинович А. Н.**  
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ РЕЖИМА РАБОТЫ КОНВЕЙЕРА ОБРА-  
БОТКИ ТУШ ОТ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ЛИНИИ УБОЯ КРС ..... 80

**Игнатюк В.И.**  
ОБ УСТОЙЧИВОСТИ ПОДКРЕПЛЕННЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ  
ОБОЛОЧЕК ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ ОСЕВЫМ СЖАТИЕМ .....86

**Монтик С. В.**  
ПРИМЕНЕНИЕ СОВРЕМЕННОГО ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ  
РАСЧЕТА ЗУБЧАТЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ПЕРЕДАЧ..... 92

**Парфиевич А.Н., Сокол В.А., Саливончик Ю.Н., Селивоник М.В.**  
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИНТЕГРАЛЬНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ДЛЯ ФОРМАЛИЗА-  
ЦИИ ПРОЦЕССА МОНИТОРИНГА И ДИАГНОСТИКИ МНОГОВАЛЬНЫХ  
ЗУБЧАТЫХ ПРИВОДОВ..... 97

<b>Савчук С. В., А. Н. Парфиевич, С. В. Монтик, Ю. Н. Саливончик, В. А. Сокол</b> АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА КОНТРОЛЯ ВЫСЕВА АГРЕГАТА ПОЧВООБРАБАТЫВАЮЩЕ-ПОСЕВНОГО МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОГО АППМ-6.....	102
--	-----

## ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ

<b>Лещик С. Д., Шупан П. И., Лещик М. С.</b> ВЛИЯНИЕ НАНОЧАСТИЦ, СИНТЕЗИРОВАННЫХ МЕТОДОМ КОНДЕНСАЦИИ ИЗ ПЛАЗМЫ ЭЛЕКТРОВЗРЫВНОГО РАЗРЯДА В ВОДЕ, НА КРОЮЩУЮ И РАССЕИВАЮЩУЮ СПОСОБНОСТЬ ЭЛЕКТРОЛИТА ХРОМИРОВАНИЯ.....	108
--	-----

<b>Медведев О. А., Дарчич Б. С.</b> ОБОСНОВАНИЕ ДОПУСТИМЫХ ПОГРЕШНОСТЕЙ СБОРОЧНОЙ ОСНАСТКИ И НЕПОДВИЖНЫХ КОМПЕНСАТОРОВ РАЗНОЙ ТОЛЩИНЫ ДЛЯ ДОСТИЖЕНИЯ ТОЧНОСТИ СБОРКИ МАШИН МЕТОДОМ РЕГУЛИРОВАНИЯ .....	112
---	-----

<b>Сергучкий Д. С., Григорьев В. Ф.</b> МЕТОДИКА ЦЕХОВЫХ ИСПЫТАНИЙ ШУМОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ОБОРУДОВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОБИЛЬНЫХ ПРИЛОЖЕНИЙ ....	116
---	-----

<b>Пряхин С.С., Ломач М.С., Рубаник В.В., Рубаник В.В. мл.</b> МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ТЕЧЕНИЯ И НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПРИ РАВНОКАНАЛЬНОМ УГЛОВОМ ПРЕССОВАНИИ.....	123
--	-----

<b>Веремейчик А.И., Онысько С.Р., Хвисевич В.М., Холодарь Б.Г., Хеук М.В., Ярмач М.А.</b> ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ НА ПОВЕРХНОСТИ МАТЕРИАЛА ПРИ ДЕЙСТВИИ ПЛАЗМЕННОЙ СТРУИ	129
--	-----

<b>Белозёров Р. Ф., Горбунов В. П.</b> АНАЛИЗ И КЛАССИФИКАЦИЯ СОВРЕМЕННЫХ СВЕРХТВЁРДЫХ МАТЕРИАЛОВ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В КАЧЕСТВЕ ЛЕЗВИЙНОГО ИНСТРУМЕНТА ДЛЯ ТОКАРНОЙ ОБРАБОТКИ ДАТЕЛЕЙ ИЗ ЗАКАЛЁННОЙ СТАЛИ .....	134
---	-----

<b>Веремейчик А.И., Нерода М.В., Холодарь Б.Г.</b> РАЗРАБОТКА ПРОГРАММЫ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ТОЧЕК ТЕЛА ПРИ СКАНИРУЮЩЕЙ ЛАЗЕРНОЙ ЗАКАЛКЕ .....	139
<b>Возняковский А.А., Овчинников Е.В., Хвисевич В.М., Чекан Н.М., Веремейчик А.И., Хусанов А.Ж.</b> СТРУКТУРА ПОЛИОЛЕФИНОВ, МОДИФИЦИРОВАННЫХ ГРАФЕНОПО- ДОБНЫМИ ЧАСТИЦАМИ.....	144
<b>Голуб В.М., Теслюк Д.В., Колодич В.В., Добрияник Ю.А., Мартынов А.В.</b> ИССЛЕДОВАНИЕ СКОРОСТИ ИЗНАШИВАНИЯ КОНТАКТНЫХ КОЛЕЦ ТОРЦОВЫХ УПЛОТНЕНИЙ С ИЗНОСОСТОЙКОЙ РАБОЧЕЙ ПОВЕРХНО- СТЬЮ.....	148
<b>Капленко В. С., Багаев С. И., Поболь И. Л.</b> КОМПЛЕКСНАЯ ОБРАБОТКА КОРРОЗИОННОСТОЙКИХ СТАЛЕЙ ДЛЯ ПОВЕРХНОСТНОГО УПРОЧНЕНИЯ МЕДИЦИНСКИХ ИЗДЕЛИЙ.....	153
<b>Костюкович Г.А., Хвисевич В.М., Овчинников Е.В., Михайлов В.В., Веремейчик А.И., Эйсымонт Е.И., Пинчук Т.И.</b> МОРФОЛОГИЯ ПОКРЫТИЙ, ФОРМИРУЕМЫХ БЕСКОНТАКТНЫМ МЕ- ТОДОМ ЭЛЕКТРОИСКРОВОГО РАЗРЯДА ИЗ ТУГОПЛАВКИХ ПОРОШКО- ВЫХ МАТЕРИАЛОВ .....	158
<b>Белый А. В., Латушкина С. Д., Посылкина О. И., Артемчик А. Г., Сечко И. А.</b> МНОГОКОМПОНЕНТНЫЕ ПОКРЫТИЯ TIN/CU, СФОРМИРОВАННЫЕ МЕТОДОМ МАГНЕТРОННОГО РАСПЫЛЕНИЯ.....	163
<b>Мартиновская О.В., Горбунов В.П.</b> СТОЙКОСТНЫЕ ИСПЫТАНИЯ СВЕРХТВЁРДЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНО- ВЕ СВН ДЛЯ ТОЧЕНИЯ ЗАКАЛЁННЫХ СТАЛЕЙ ТИПА СТАЛИ 45 .....	167
<b>Миширук О.М., Веремейчик А.И., Девойно О.Г., Нерода М.В., Холодарь Б.Г.</b> ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ СТАЛИ 10Г2 ПОСЛЕ ЛАЗЕРНОЙ ЗАКАЛКИ И ЛЕГИРОВАНИЯ.....	172
<b>Овчинников Е.В., Хвисевич В.М., Григорьева Т.Ф., Эйсымонт Е.И., Пинчук Т.И., Веремейчик А.И., Кузнецова Е.В.</b> МОРФОЛОГИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ, МОДИФИЦИРО- ВАННЫХ МЕХАНОАКТИВИРОВАННЫМИ НАНОФАЗНЫМИ ЧАСТИЦАМИ .....	177

<b>Овчинников Е.В., Чекан Н.М. , Хвисевич В.М., Акула И.П., Веремейчик А.И.</b> МОРФОЛОГИЯ ВЫСОКОЭНТРОПИЙНЫХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ РЕФРАКТОРНЫХ МЕТАЛЛОВ.....	181
<b>Предко А. А., Олешук И. Г., Моисеенко А. Н., Поболь И. Л., Хома М. Ю., Кананович Н. А.</b> ИОННО-ПЛАЗМЕННОЕ АЗОТИРОВАНИЕ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА АМг5 .....	186
<b>Акула И. П. , Чек,ан Н. М., Хома М. Ю., Сергеенко С. Е., Шпак Е. П.</b> ВЛИЯНИЕ СЕПАРАЦИИ ПЛАЗМЫ НА СВОЙСТВА КАТОДНО-ДУГОВЫХ ПОКРЫТИЙ AlTiSiN .....	191
<b>Глебов А.О.</b> ТОПОЛОГИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ УСТРОЙСТВ СТАЦИОНАРНОГО НАГРЕВА.....	198

Научное издание

# НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И МАТЕРИАЛЫ, АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА

Сборник статей  
международной научно-технической конференции

(Брест, 16–17 ноября 2023 года)

*Текст печатается в авторской редакции, пунктуации и орфографии*

Ответственный за выпуск: Голуб В. М.

Редактор: Митлошук М. А.

Компьютерная верстка: Митлошук М. А.

Издательство БрГТУ.

Свидетельство о государственной регистрации  
издателя, изготовителя, распространителя печатных  
изданий № 1/235 от 24.03.2014 г., № 3/1569 от 16.10.2017 г.

Подписано в печать 15.11.2023 г. Формат 60x84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>.

Бумага «Performer». Гарнитура «Times New Roman».

Усл. печ. л. 13,13. Уч. изд. л. 12,86. Заказ № 1235. Тираж 35 экз.

Отпечатано на ризографе учреждения образования  
«Брестский государственный технический университет».  
224017, г. Брест, ул. Московская, 267.

ISBN 978-985-493606-2



