

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Учреждение образования
«Брестский государственный технический университет»

**НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И МАТЕРИАЛЫ,
АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА**

**Сборник статей
международной научно-технической конференции**

(Брест, 20–21 октября 2022 года)

Брест 2022

УДК 681.5; 539.3; 658.51; 621
Н72

Рецензенты:

заведующий кафедрой «Порошковая металлургия, сварка и технология материалов» УО «Белорусский национальный технический университет», член-корреспондент НАН Беларуси, Заслуженный деятель науки Республики Беларусь, д. т. н., профессор *Пантелеенко Ф. И.*

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

Редакционная коллегия:

Онысько С. Р. – декан машиностроительного факультета БрГТУ, к. т. н., доцент;

Голуб В. М. – заведующий кафедрой машиноведения БрГТУ, к. т. н., доцент;

Прокопеня О. Н. – заведующий кафедрой АТПиП БрГТУ, к. т. н., доцент;

Парфиевич А. Н. – заведующий кафедрой ПМ БрГТУ;

Монтик С. В. – заведующий кафедрой МЭА БрГТУ, к. т. н., доцент;

Игнатюк В. И. – профессор кафедры ПМ БрГТУ, к. т. н., доцент; ПМ БрГТУ, к. т. н., доцент

Н72 Новые технологии и материалы, автоматизация производства: сборник статей / Брестский государственный технический университет. – Брест : Издательство БрГТУ, 2022. – 265 с.

ISBN 978-985-493-586-3.

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», 20–21 октября 2022 г.

Сборник предназначен для специалистов, работающих в сфере машиностроения, автосервиса, 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 978-985-493-586-3

© Издательство БрГТУ, 2022

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

МЕТОДЫ ИДЕНТИФИКАЦИИ НЕПРЕРЫВНЫХ ОБЪЕКТОВ

Базарбаев К. А., Олиферович Н. М., Гринюк Д. А.
*Белорусский государственный технологический университет,
г. Минск, Республика Беларусь*

Очень важно иметь четкое представление о системе в целом, перед тем как начинать работу с ней: решать вопросы настройки регуляторов, осуществлять управление. На практике зачастую анализ тех или иных систем происходит путем идентификации и математического моделирования. Моделирование и идентификация связаны между собой и являются ключевыми процессами при изучении систем. Они являются предварительной стадией перед практическим построением реальных контуров автоматического управления.

Математическое моделирование систем само по себе является обширной областью, богатой множеством методик, основанных на различных подходах и принципах, хорошо зарекомендовавших себя. Среди множества вариантов трудно переоценить моделирование на основе физических принципов. Применение данных подходов при моделировании реальной физической системы дает нам в общей форме математическое описание с основными параметрами. Итоговая модель фактически представляет собой класс моделей, из которых поиск конкретного члена осуществляется посредством процесса идентификации и оценки параметров системы.

В литературе можно найти множество обзоров обширного класса системной идентификации. Так, вопросы идентификации непрерывных систем рассматривались в [1–3]. Следует рассмотреть общие предпосылки двух основных параметров идентификации системы, а именно: «уставка дискретного времени DT » и «уставка, которая учитывает неотъемлемую составляющую непрерывного времени» и попытки установить аспекты непрерывного времени (CT) в перспективе идентификации системы, что позволяет, в свою очередь, сохранить общую картину системной идентификации путем интеграции определенных характеристик.

Основные проблемы идентификации реальных объектов и систем были сформулированы Задэ [4] и в общем виде могут быть представлены структурой, представленной на рисунке 1.

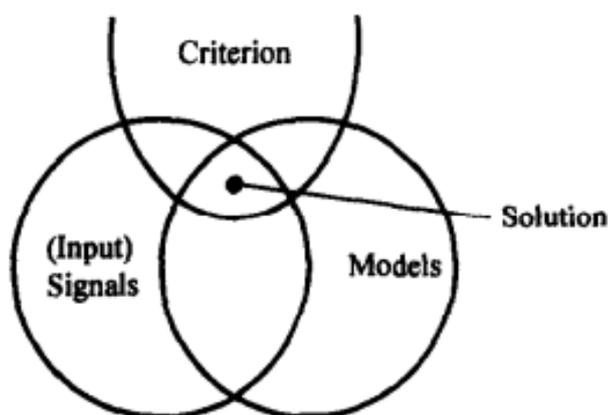


Рисунок 1 – Задачи идентификации системы

Она характеризуется тремя составляющими: классом моделей, классом входных сигналов и критериями. Результат решения задачи идентификации системы будет успешным, если исходная задача правильно сформулирована в терминах вышеперечисленных составляющих. Класс моделей должен быть соответствующим, а набор сигналов должен обладать свойством стойкого возбуждения относительно модельного класса. Идентификация системы обычно не является самостоятельной задачей, а предназначена для дальнейшей обработки. Аструм и Эйхофф проводили анализ роли трех составляющих в проблеме системной идентификации. Например, классификация основных методов основана на критерии, порождающем выходную ошибку (*OE*), ошибку уравнения (*EE*), прогнозируемую ошибку (*PE*) и т. д. Различные формы модели, которые возникают из-за характера системы, требуют различных подходов при их обработке. В частности, модели *CT* требуют специальных подходов к обработке сигналов. Общая схема методов идентификации на основе *CT* показана на рисунке 2.

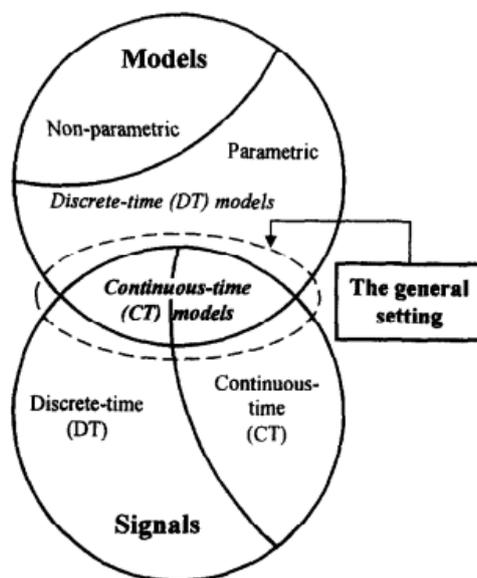


Рисунок 2 – Общая настройка для идентификации непрерывных систем

Можно выделить следующие преимущества моделей *CT*:

- модели физических систем, выведенные из физических принципов, по своей сути непрерывны во времени, потому что физические законы, на которых основано такое моделирование, находятся в *CT*;
- модели *CT* помогают лучше понять физическое поведение рассматриваемой системы. Параметры модели сильно коррелируют с физическими свойствами системы;
- не возникает вопросов чрезмерной чувствительности по отношению к параметрам модели, которые возникают в случае дискретизации;
- частичные знания, если они есть, сохраняются в моделях *CT*. Если модель *CT*, содержащая набор известных параметров, дискретизируется, то в процессе дискретизации они теряются;
- дискретизация моделей *CT* может привести к неестественному неминимально-фазовому характеру;

– обычные методы DT не гармонируют с поведением CT ; в пределе сокращенного периода дискретизации они не сходятся к результатам, соответствующим исходной модели CT .

Обратный переход от модели DT к исходной модели CT является нетривиальной задачей.

Основная трудность в работе с моделями CT обусловлена наличием операторов производной, связанного с входными и выходными сигналами. Пока эти сигналы доступны для измерения с учетом наличия соответствующих искажающих шумов, прямое определение требуемых производных проводить нежелательно. Эта трудность должна быть устранена предварительной обработкой сигналов. В качестве альтернативы, дискретизация модели CT должна быть выполнена с использованием нетрадиционного оператора дискретного времени (UDT), который соответствует CT в том смысле, что модель DT сходится к исходной версии CT , когда интервал выборки стремится к нулю.

Различные подходы, которые описываются в литературе, могут быть классифицированы как показано на рисунке 3, на котором класс модели обозначен как CT/UDT .

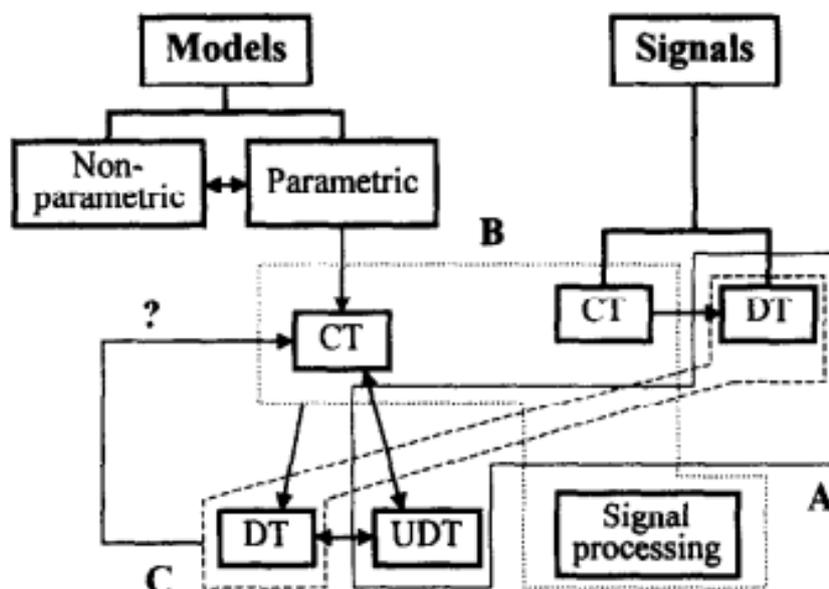


Рисунок 3 – Подходы к идентификации непрерывных систем при комплексном подходе

Различные подходы к идентификации непрерывных систем можно разделить на три широких класса, как показано на рисунке 3. Они основаны на общей структуре, представленной на рисунке 4.

Согласно рисунку 3 это следующие классы:

А: Подходы, использующие сигналы DT для идентификации модели DT , которая затем преобразуется в исходную форму CT .

В: Подходы, использующие сигналы CT для прямой идентификации собственной модели CT .

С: Подходы, использующие сигналы DT , приводят к модели UDT , которая сходится к своей исходной CT .

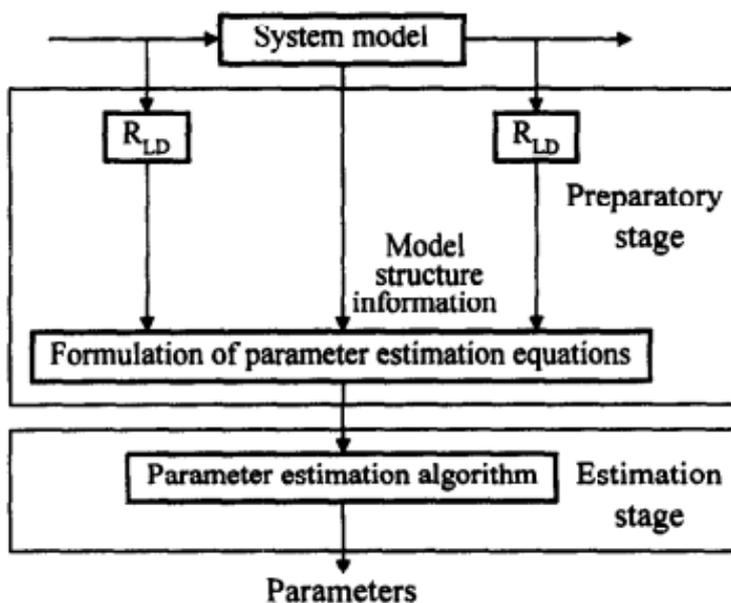
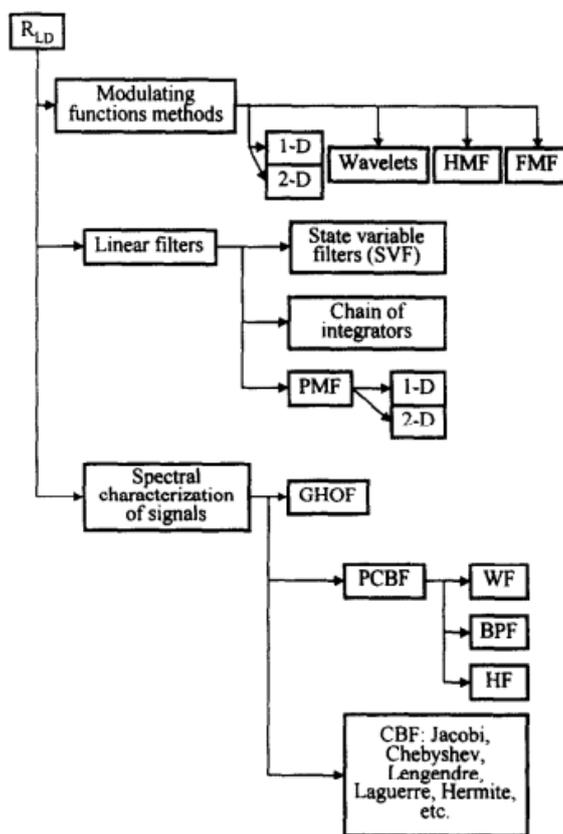


Рисунок 4 – Общая структура для идентификации систем непрерывного времени



PMF – функционалы момента Пуассона; *GHOF* – общие гибридные ортогональные функции; *PCBF* – кусочно-постоянные базисные функции; *CBF* – непрерывные базисные функции; *WF* – функции Уолша; *HF* – функции Хаара; *BPF* – функции блочного импульса; *HMF* – функции модуляции Хартли; *FMF* – функции модуляции Фурье

Рисунок 5 – Несколько вариантов операции предварительной обработки сигнала *RLD*

Необходимость генерировать производные по времени в моделях *СТ* устраняется классом методов обработки сигналов, обозначаемых операцией *RLD*. Предшественником этого класса методов является метод модуляции функций [5]. На рисунке 5 показано генеалогическое древо различных методов обработки сигналов, относящихся к этому классу.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Aström, K. J. System identification / K. J. Aström, P. Eykhoff. – 1971. – A survey. *Automatica*, 7(2). – pp. 123–162,
2. Young P. Parameter estimation for continuous-time models P. Young. – A survey, *Automatica*. – vol.17. – issue.1. – pp. 23–39, 1981.
3. H. Unbehauen and G. P. Rao, Continuous-time approaches to system identification – A survey, *Automatica*, vol.26, issue.1, pp. 23-35, 1990.
4. Zaden, L. A. From Circuit Theory to System Theory. / L. A. Zaden. – 1962. – Proc. IRE, vol. 50. – pp. 856–865.
5. Shinbrot, M. On the analysis of 1Linear and nonlinear systems / M. Shinbrot. *Trans. ASME*. 1957. – № 79. –pp. 457–547.

УДК 681.5

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ИЗМЕРЯЕМОЙ СРЕДЫ НА ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕРМОМЕТРОВ

Бакаленко В. И., Дейнека Т. А.

*Белорусский государственный технологический университет,
г. Минск, Беларусь*

В [1], [2] рассматривался способ уменьшения инерционности термометров путем обработки микроконтроллером в реальном масштабе времени данных, поступающих с первичного преобразователя, где отмечалось, что применимость метода во многом зависит от того, насколько принятая в модели постоянная времени (T_M) соответствует реальной (T_0).

При ступенчатом изменении измеряемого параметра максимальную ошибку, обусловленную отличием реальной постоянной времени термометра от модели, можно оценить по формуле

$$\delta(T_0, T_M, \Delta t) = \frac{1 - e^{-\frac{\Delta t}{T_0}}}{1 - e^{-\frac{\Delta t}{T_M}}} = \frac{1 - e^{-\frac{T_M}{T_0 \cdot n}}}{1 - e^{-\frac{T_M}{T_0 \cdot n}}}, \quad (1)$$

где Δt – интервал измерений.

Интервал измерений выбирается как часть постоянной времени модели, то есть $\Delta t = T_M/n$.

Зависимость ошибки расчета от интервала измерений и отношения T_M/T_0 показана на рисунке 1. Из рисунка следует, что уменьшение интервала измерений

более чувствительно к отклонениям постоянной времени математической модели от реального значения.

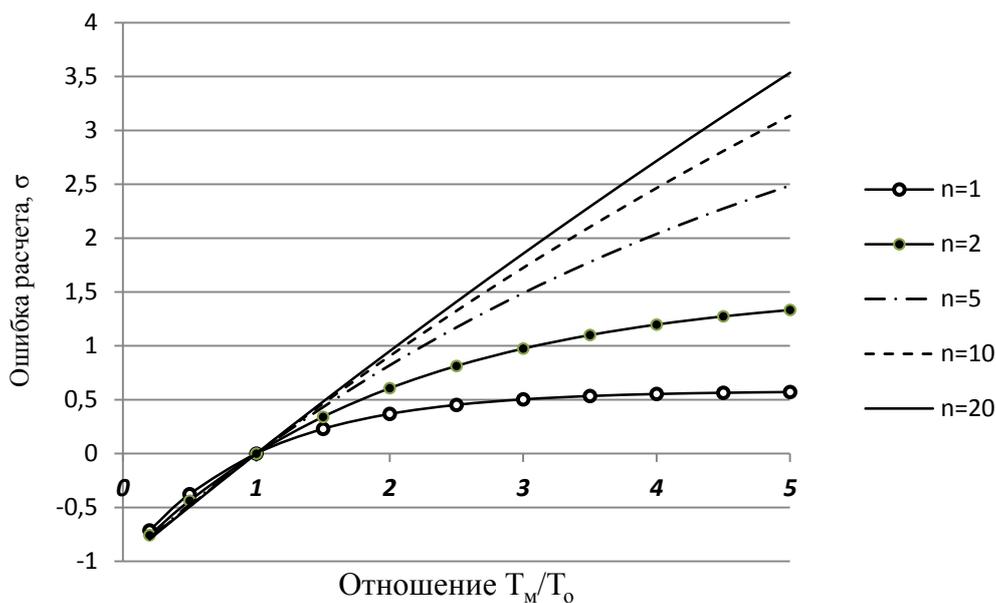


Рисунок 1 – Зависимость ошибки расчета от интервала измерений

Постоянную времени термометра (T_m) без защитной гильзы можно представить в виде

$$T_m = \frac{c_p \cdot m}{\alpha \cdot F}, \quad (2)$$

где c_p и m – теплоёмкость и масса термометра;
 F – площадь термометра, контактирующая со средой;
 α – коэффициент теплоотдачи.

Конструктивные параметры (масса термометра и площадь теплообмена) в процессе измерений остаются неизменными и, следовательно, не приводят к изменению постоянной времени модели. Изменением теплоемкости материала термометра (стали) можно пренебречь, т. к. она увеличивается на 3–5 % с ростом температуры на каждые 100 °С.

Наибольшее влияние на постоянную времени оказывает изменение коэффициента теплоотдачи (α), который зависит от параметров среды и скорости движения.

Коэффициент теплоотдачи при обтекании цилиндра может быть определен из критериальных уравнений [3]:

для жидкости при $Re > 10^3$:

$$Nu = 0,28 Re^{0,6} Pr_{жс}^{0,36} (Pr_{жс} / Pr_{ст})^{0,35}; \quad (3)$$

для воздуха при $Re > 10^3$:

$$Nu = 0,245 Re^{0,6}, \quad (4)$$

где Nu – критерий Нуссельта; Pr – критерий Прандтля; Re – критерий Рейнольдса.

В формуле (1) критерии $Pr_{жс}$ и $Pr_{ст}$ рассчитаны соответственно при температурах жидкости и стенки.

Тогда, подставляя в (1) и (2) значения критериев

$$Re = \frac{\rho V \Psi}{\mu}, \quad Nu = \frac{\alpha \cdot d}{\lambda}, \quad Pr = \frac{\mu \cdot c_p}{\lambda},$$

получим:

для жидкости при равенстве температур измеряемой среды и корпуса термометра

$$\alpha = 0,28 \cdot \frac{(\rho V)^{0,6} c_p^{0,36}}{\mu^{0,24} \lambda^{0,64} d^{0,4}}; \quad (5)$$

для воздуха:

$$\alpha = 0,245 \cdot \left(\frac{\rho V}{\mu} \right)^{0,6} \cdot \frac{\lambda}{d^{0,4}}, \quad (6)$$

где d – диаметр трубопровода; μ – динамическая вязкость среды; ρ – плотность среды; λ – теплопроводность среды.

В диапазоне от 0 до 100 °С зависимость плотности, теплопроводности и вязкости воздуха от температуры с погрешностью не более 5 % можно выразить линейными уравнениями:

$$\rho_t = 1,26 - 0,0034 \cdot t, \quad (7)$$

$$\mu_t = (17,2 + 0,048 \cdot t) \cdot 10^{-5}, \quad (8)$$

$$\lambda_t = (2,44 + 0,008 \cdot t) \cdot 10^{-2}. \quad (9)$$

Подставляя (7), (8) и (9) в (6), получим, что в потоке воздуха в диапазоне температур от 10 до 100 °С коэффициент теплоотдачи изменяется не более чем на 10 %, и изменением постоянной времени можно пренебречь (рисунок 2).

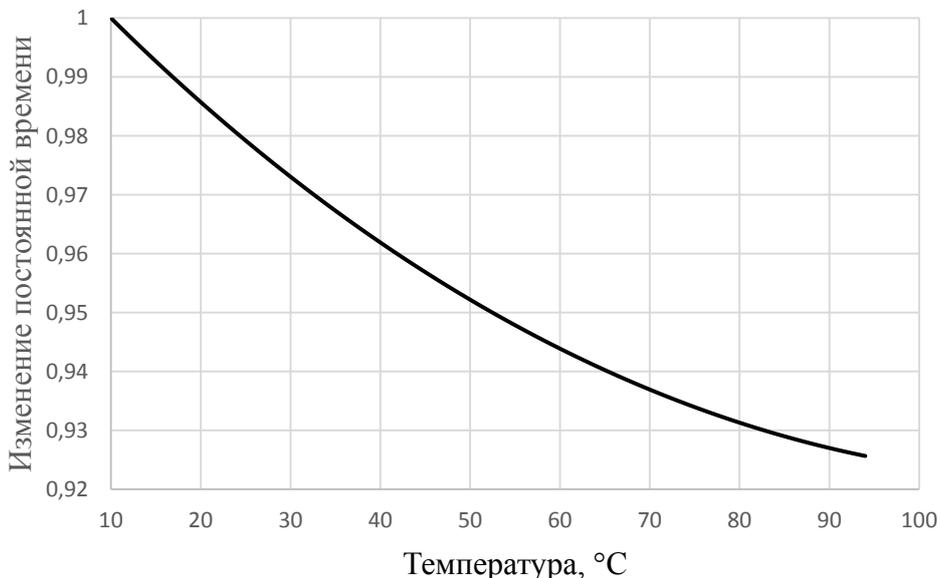


Рисунок 2 – Изменение постоянной времени в воздухе

Зависимости плотности, вязкости и теплопроводности от температуры для жидкостей имеют более сложный характер.

Вязкость масел в диапазоне температур от 10 до 100 °С уменьшается в 10 раз, при этом зависимость практически линейная. Плотность также линейно уменьшается, но в значительно меньшей степени (около 10–15 %).

Для воды зависимости имеют нелинейный характер и в диапазоне от 20 до 100 °С с погрешностью не более 5 % могут быть представлены в виде:

$$\rho_t = (1000 - 0,07 \cdot t - 0,0036 \cdot t^2), \quad (10)$$

$$\mu_t = (1,6 \cdot e^{-0,02t}) \cdot 10^{-3}, \quad (11)$$

$$\lambda_t = (0,55 + 0,0026 \cdot t - 1 \cdot 10^{-5} \cdot t^2). \quad (12)$$

Аналогично, подставляя (10), (11) и (12) в (5), получим зависимость изменения постоянной времени от температуры (рисунок 3).

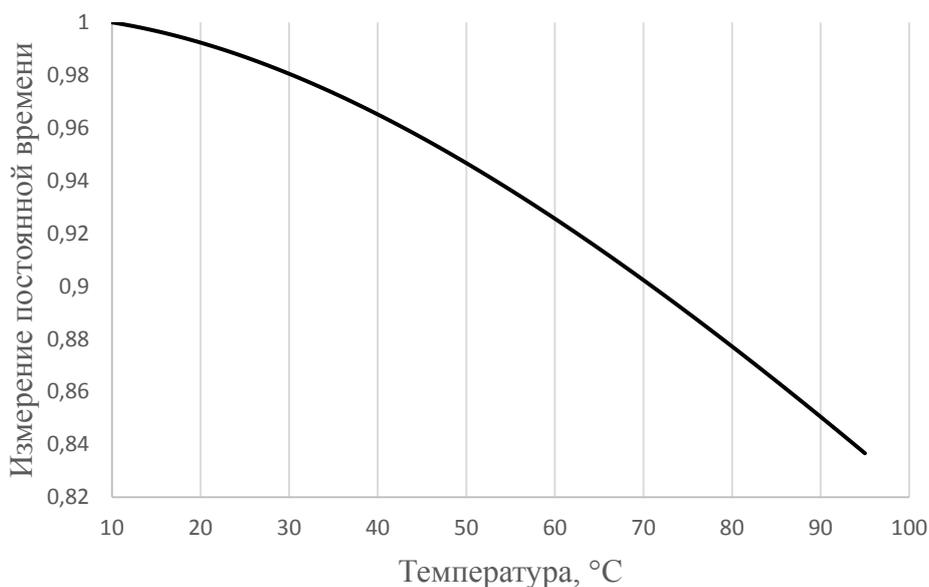


Рисунок 3 – Изменение постоянной времени в воде

Для воды влияние температуры более существенно, но в исследуемом диапазоне температур не превышает 20%.

Таким образом, наиболее существенное влияние на постоянную времени средства измерения оказывает изменение скорости потока. В реальных условиях (при изменении положения регулирующего органа) скорость потока может изменяться в десятки раз. Например, при изменении скорости потока в 20 раз (при постоянной температуре) постоянная времени уменьшится в 6 раз.

Использование (3) и (4), при составлении модели термометра для [1], позволит получать корректные данные даже при использовании малых интервалов изменений.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Бакаленко, В. И. Улучшение динамических характеристик термометров / В. И. Бакаленко, Д. С. Карпович // 84-я научно-техническая конференции профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов БГТУ. Секция химической технологии и техники. – Минск, 2020. – С. 287–289.

2. Бакаленко, В. И. Уменьшение погрешности средств измерений / В. И. Бакаленко, Т. А. Дейнека // Нефтехимия – 2021 : материалы IV Международного научно-технического форума по химическим технологиям и нефтегазопереработке, Минск, 22–24 ноября 2021 г. – Минск : БГТУ, 2021. – С. 243–244.

3. Михеев М. А. Основы теплопередачи / М. А. Михеев, И. М. Михеева. – Изд. 2-е, стереотип. М., «Энергия», 1977, 344 с. с ил.

УДК 621.316.7

КОМПЕНСАТОР РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ БЫТОВЫХ НАГРУЗОК

Вабищевич Л. И., Ярошевич А. В.

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

Потери в сетях электроснабжения анализируются давно, обстоятельно и системно. В полной мере это относится и к потерям из-за реактивных нагрузок. Однако, ситуация в бытовом потреблении электроэнергии анализируется в самом общем виде. Требования к компенсаторам реактивной мощности (КРМ) для бытовых нагрузок не сформулированы. Учитывая значительную долю бытового потребления электроэнергии, задача разработки КРМ является актуальной. Способ решения этой задачи и некоторые требования к устройствам предложены путём применения аналоговой схемы вычислителя для КРМ [1].

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

Распространение бытовых приборов с трансформаторами, электродвигателями и сложными электронными цепями привело к появлению реактивной (индуктивной) составляющей мощности (РМ), $\cos\varphi$ в таких цепях может составлять $\cos\varphi = 0,65 \dots 0,97$ [2]. Средневзвешенное значение $\cos\varphi = 0,85$.

Передача РМ к потребителю и ее потребление в сети приводят к дополнительным потерям активной мощности (АМ) в распределительных электрических сетях. При значении $\cos\varphi = 0,85$ РМ составляет 60 % от АМ. Вследствие этого возрастают и активные потери от передачи электроэнергии, которые при $\cos\varphi = 0,85$ составляют 15 % от полезной активной мощности у потребителя при 10% в случае чисто активной нагрузки.

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 рисунке 1.

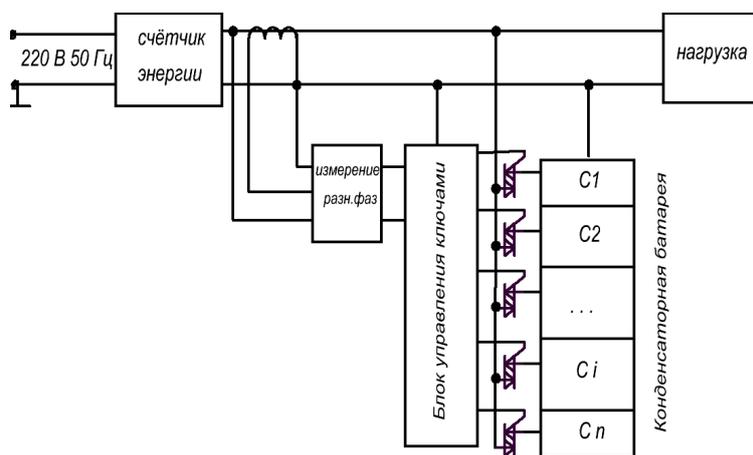


Рисунок 1 – Схема компенсатора

Наиболее эффективно можно реализовать схему компенсации РМ при использовании функции измерения разности фаз сетевого напряжения и тока нагрузки в электронном счётчике потребляемой электроэнергии. Для этого необходимо получить право доступа к соответствующим цепям счётчика.

Фазометр предназначен для измерения углов сдвига фаз между двумя изменяющимися периодически электрическими колебаниями. Предлагаемый электронный фазометр дает одновременно информацию о знаке и величине угла сдвига фаз.

Наиболее простые схемы реализуют метод, основанный на преобразовании интервала времени в напряжение [3].

Погрешности, присущие этому методу, обусловлены следующими характеристиками схем, реализующих фазометр. Частотный диапазон метода со стороны низких частот ограничен фильтром низких частот. Ограничение со стороны высоких частот определяется быстродействием логических микросхем. Точность измерения зависит от точности задания напряжения V_p , разности задержек во входных блоках фазового детектора и погрешности, с которой компараторы реагируют на пересечение входными сигналами нуля. Эта погрешность является результатом различия напряжений смещения у компараторов. Момент срабатывания компаратора зависит от скорости изменения входного сигнала.

В рассмотренном методе фактически измеряется время между моментами пересечения входными сигналами нуля. Форма входного сигнала не будет оказывать существенного влияния на результат измерения.

Предложено несколько схем реализации фазового детектора с компараторами входных сигналов. Рассмотрим детекторы с наиболее простой схемной реализацией. Самой простой схемой представлен детектор на ограничителях. Моделирование производилось при различных значениях входного напряжения в диапазоне $\Delta\varphi$ от 0 до 100 угловых градусов.

Результаты моделирования представлены на графике в рисунке 2 (ряд 3). Анализ результатов позволяет отметить два основных недостатка этой схемы. Первый – чувствительность невысокая, составляет около 5м В/град. Второй –

на углах до 30 градусов схема фактически не реагирует на разность фаз, это конструктивный недостаток схемы, не позволяющий применять её в вычислителе КРМ.

Небольшим по количеству элементов является фазометр на компараторах с транзисторными ключами. Результаты моделирования представлены в Таблице 1 ($u_{вых2}$) и на графике в рисунке 2 (ряд 2). По сравнению с предыдущей схемой чувствительность прибора значительно выше и составляет около 25 мВ/град. График представляет прямо пропорциональную практически линейную зависимость.

Несколько меньшее число элементов требуется для реализации схемы фазометра на компараторах с D – триггером. Результаты моделирования представлены в Таблице 1 ($u_{вых1}$) и на графике в рисунке 2 (ряд 1). По сравнению с предыдущей схемой чувствительность прибора ниже и составляет около 15мВ/град. График представляет обратно пропорциональную практически линейную зависимость.

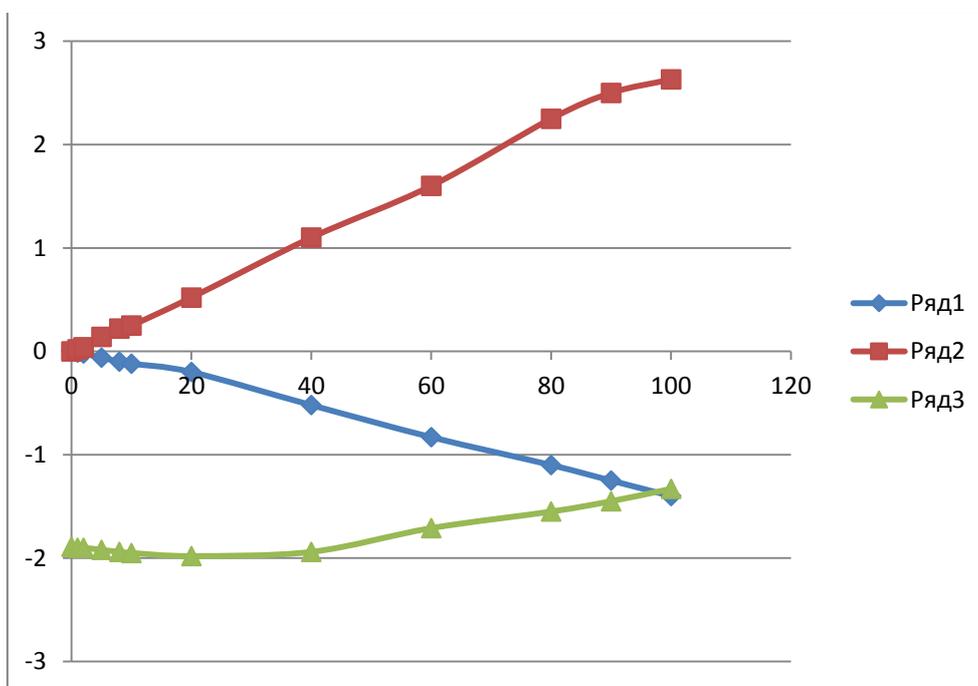


Рисунок 2 – Характеристики фазометров

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.

Схему управления ключами предлагается реализовать на основе асимптотических формул для расчёта ёмкости компенсирующего конденсатора [1].

Полная мощность нагрузки

$$\tilde{S} = UI\cos\varphi + jUI\sin\varphi = P + jQ, \quad (1),$$

где P – активная;
 Q – реактивная мощности.
 $Q/P = \operatorname{tg}\varphi$.

При средневзвешенном значении $\cos\varphi = 0,85$ погрешность от представления $\operatorname{tg}\varphi \approx \varphi$ (рад) не превысит 0,1 от значения $\operatorname{tg}\varphi$. Тогда соотношение активной и реактивной мощности можно представить формулой $Q/P \approx \varphi$.

Погрешность от представления $\cos\varphi \approx 1 - \varphi$ не превысит 0,12 значения $\cos\varphi$, тогда активную мощность можно представить формулой $P \approx UI(1-\varphi)$, реактивную мощность $Q \approx UI(1-\varphi)\varphi$.

Индуктивная мощность нагрузки, подлежащая компенсации

$$Q_L \approx UI_N(1-\varphi)\varphi,$$

где U – напряжение сети; I_N – ток в нагрузке.

С другой стороны – ёмкостная РМ

$$Q_C = I_C^2 / (2\pi fC), \quad (6)$$

где f – частота сети; C – ёмкость компенсирующего конденсатора; $I_C = I_N \sin\varphi \approx I_N\varphi$ – ток ёмкости. Отсюда можно получить соотношение

$$C \approx \frac{I_N\varphi}{2\pi fU(1-\varphi)} \text{ (Ф)},$$

а с учётом значений $f = 50$ Гц, $U = 220$ В

$$C \approx kI_N\varphi \text{ (Ф)} \quad (9),$$

где $k \approx 0,000015$.

Для вычисления значения ёмкости в МкФ коэффициент $k = 15$, тогда

$$C \approx 15 I_N\varphi \text{ (МкФ)}.$$

Эта асимптотическая формула может быть основой для построения схемы управления ключами.

Перемножение аналоговых сигналов I_N на $\frac{\varphi}{1-\varphi}$ выполняется схемами с операционными усилителями.

С помощью логарифмических схем и операционных усилителей (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 $\frac{I}{I_0} \gg 1$

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

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

Структурная схема АЦП включает в себя источник опорного напряжения $U_{\text{оп}}$, резистивный делитель $R_1 - R_{N+1}$, компараторы КН, преобразователь кодов, генератор тактовых импульсов ГТИ.

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 $U(t) = (1 - \frac{1}{2^n})U_{\text{оп}}$.

АЦП имеет выходной трехразрядный двоичный код $a_0a_1a_2$, делитель состоит из восьми резисторов и универсальный код имеет семь разрядов

($X_1 - X_7$). Конденсаторная батарея может быть построена на специальных компенсирующих конденсаторах. Расчёт ёмкости батареи конденсаторов при токе нагрузки $I_H = 25\text{А}$ и средневзвешенном значении $\cos\varphi = 0,85$ даёт величину $C = 320\text{ МкФ}$.

Существующие схемы и устройства компенсации РМ созданы для мощных промышленных потребителей и не могут использоваться в квартирных распределительных сетях.

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

Использование простых асимптотических соотношений для расчёта ёмкости позволяет построить простую надёжную схему управления ключами для коммутации конденсаторов.

Использование простой и недорогой схемы в цепях бытовой нагрузки позволяет получить существенную экономию потребителю и сократить потери при передаче электроэнергии.

Потребление электроэнергии в жилищном секторе Беларуси [4] постоянно растёт и составляет около 20 % от общего количества потребленной электроэнергии. Поэтому бытовое потребление электроэнергии существенно влияет на форму графика нагрузки белорусской энергосистемы. В целом потребителями электроэнергии белорусской энергосистемы является около 4 млн бытовых абонентов (семей). Жилищный сектор имеет наибольшие технологические и коммерческие потери электрической энергии по сравнению с другими группами потребителей электрической энергии (например, промышленными потребителями).

Следует отметить, что, по данным VDEW [5] (Association of German Power Supply Companies), в распределительных электросетях Германии, благодаря КРМ до средневзвешенного значения $\cos\varphi = 0,9$, только в 1999 году было сэкономлено порядка 9 млрд кВт·ч активной энергии, что составило более 20 % от суммарного (36,4 млрд кВт·ч) объема транзитных потерь (PowerFactorCorrection. Power Quality Solutions. Published by Epcos AG. Edition 04/2006. Ordering No. EPC: 26017-7600. Printed in Germany. 79).

Опыт использования компенсаторов реактивной мощности показывает возможность сокращения потерь электроэнергии до 5 % от потребляемой мощности. Применение простых и недорогих компенсаторов, устанавливаемых в непосредственной близости от потребителей энергии с индуктивным характером нагрузки, может решить проблему сокращения потерь.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Ярошевич А. В. Схема компенсации реактивной мощности в квартирных электрических сетях / А. В. Ярошевич // Вестник Брестского государственного технического университета – 2011. – № 5 (71) : Физика, математика, информатика. С. 66–67.
2. Шишкин, С. А. Реактивная мощность потребителей и сетевые потери электроэнергии / С. А. Шишкин // Энергосбережение. – 2004. № 4.
3. Бутев, В. Электронный фазометр / В. Бутев // Радио. – 1990. № 5.
4. PoleCap PFC Capacitors for Outdoor Low-Voltage PFC Applications. Published by EPCOS AG. 03/2005. Ordering No. EPC: 26015

УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКИМИ СРЕДСТВАМИ И КОМПЛЕКСНОЙ СИСТЕМОЙ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ

Джумаев А., Атаев Э.

*Государственный энергетический институт Туркменистана,
г. Мары, Туркменистан*

Энергоснабжение на базе возобновляемых источников энергии (ВИЭ) более экологично и безопасно, а также более чище в процессе производства. Фотоэлектрические солнечные станции (ФСС) могут быть использованы для производства большего количества энергии постоянного тока, но и для энергоснабжения небольшого цеха, жилого дома или небольшого предприятия.

В статье приведена общая схема электроснабжения с применением ФСС, выполнены соответствующие расчеты и, самое главное, это может быть не столько заменой существующей системе энергоснабжения, сколько для защиты окружающей среды.

Управление техническими средствами комплексной системы энергоснабжения требует рассмотрение следующих вопросов:

- ресурсы возобновляемых источников энергии на рассматриваемой территории;
- создание нормативно-правовой базы для развития возобновляемой энергетики;
- методика проектирования и расчета ФСС;
- пилотные проекты ФСС.

В настоящее время современное состояние энергетики и необходимость разработки новых энергетических технологий, позволяющих повысить энергообеспеченность производства, минимизировать воздействие на окружающую среду, развить малые и средние хозяйства и предприятия, нуждающиеся в автономных энергоисточниках, способствовало выделению ВИЭ в отдельное направление науки и техники. На территории Туркменистана в качестве таких энергоресурсов наиболее актуально рассматривать использование солнечной энергии. Было проведено районирование по средним данным суммарной солнечной энергии, поступающей на поверхность оптимально ориентированной солнечной панели на территории страны для административных районов Туркменистана. В расчетах угол наклона солнечной панели, ориентированной на юг, равен $\beta = 36^{\circ}$. Пространственное распределение годовых величин суммарной солнечной энергии (выраженные в кВт·ч/м²) для любого региона Туркменистана представлено на соответствующей карте, т. е. в кадастре солнечной энергии. Согласно этому кадастру на территории Туркменистана выделяются 5 зон с соответствующим распределением годовых величин суммарной солнечной энергии, т. е. I-я зона с 1870–2000 кВт·ч/м² год, II-я зона с 1850–1870 кВт·ч/м² год, III-я зона с 1800–1850 кВт·ч/м² год, IV-я зона с 1750–1800 кВт·ч/м² год, V-я зона с 1630–1750 кВт·ч/м² год [1].

В Туркменистане создана нормативно-правовая база для развития возобновляемой энергетики. Основные мероприятия по снижению выбросов CO₂ в Туркменистане будут реализованы согласно утвержденному Постановлением Президента Туркменистана Национальной стратегии Туркменистана по изменению климата [2], Национальной стратегии по развитию возобновляемой энергетики до 2030 года [3] и закона Туркменистана «О возобновляемых источниках энергии» [4].

Прогнозирование и управление выработки энергии сетевой или автономной ФСС на основании расчетов и измерений является наряду с учетом капитальных затрат одной из важнейших составляющих оценки экономической целесообразности строительства ФСС. Используемые нами этапы проектирования и методика расчета приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Этапы проектирования и методика расчета

Этапы проектирования	Расчетная формула	Принятые параметры
1 этап, расчет вых. мощности ФСС	$P_{oc,i} = P_{н,i} / \eta_i,$ $P_{н,j} = \sum_{i=1}^N P_{oc,i},$ $P_n = \max\{P_{н,j}\}, \forall j \in \overline{1, M}$	$\eta_i = 0,8,$ $\eta_i = 1,0,$ $\Delta t_{дв} = 14ч$ (с 6.00 до 20.00) – лето, $\Delta t_{дв} = 8ч$ (с 8.00 до 16.00) – зима
2 этап, расчет емкости аккумулятора	$\Delta C = \frac{P_n}{U_n} \Delta t_{нв} = \frac{P_n}{U_n} (24 - \Delta t_{дв}),$ $S_p = \frac{C_n - C_{min}}{C_n} 100\% = \frac{\Delta C}{C_n} 100\%,$ $C_n = \frac{100 P_n}{S_p U_n} \Delta t_{нв},$ $I_p = P_n / U_n, \quad W = C_n U_n,$ $n = U_n / U_{аб}, \quad m = C_n / C_{аб},$ $N = nm,$ $N = \frac{100 P_n}{S_p W_{аб}}, \quad W_{аб} = C_{аб} U_{аб},$ $U_n = \frac{100 P_n}{S_p m C_{аб}} \Delta t_{нв},$ $\Delta C_1 = \frac{P_{н1}}{U_n} \Delta t_1, \quad \Delta C_2 = \frac{P_{н2}}{U_n} \Delta t_2,$ $\Delta C = \Delta C_1 + \Delta C_2,$ $C_n = \frac{100}{S_p U_n} (P_{н1} \Delta t_1 + P_{н2} \Delta t_2)$	$\Delta t_{нв} = 10ч$ -лето, $\Delta t_{нв} = 16ч$ -зима, $S_p = 70 \%$,
3 этап, расчет мощн. зарядного устройства	$P_{зч} = n I_{max.зар} U_{max.зар} = 1,375 n I_{max.зар} U_{аб}$	1. Заряд при постоянстве тока производится током, значение которого равно 10 % от номинальной емкости при 20-часовом режиме заряде. Максимальное значение зарядного тока составляет от 0,2 до 0,3 емкости аккумулятора. 2. При заряде при постоянстве напряжения степень заряженности аккумуляторной батареи по окончании заряда напрямую зависит от значения зарядного напряжения. 24 ч. непрерывного заряда при напряжении 14,4 В полностью разряженная 12-вольтовая батарея зарядится на 75–85 %. При напряжении 15 В – на 85–90%, а при напряжении 16 В – на 95–97 %. Полностью зарядить разряженную батарею в течение 20–24 ч. Можно при напряжении 16,3–16,4 В. $U_{аб} = 12 В,$ $I_{max.зар} = 0,2 C / 1 ч$ $U_{max.зар} = 16,5 В,$

Продолжение таблицы 1

4 этап, расчет мощн. основной шины	$P_{\text{ош}} = P_{\text{н}} + P_{\text{зу}}/\eta_2$	η_1 – КПД импульсного преобразователя постоянного напряжения понижающего типа η_2 – КПД зарядного устройства
5 этап, расчет мощн. солнечной батареи	$P_{\text{сб}} = P_{\text{ош}}/\eta_1 = P_{\text{н}}/\eta_1 + P_{\text{зу}}/\eta_1\eta_2,$ $W = kEP_w/1000$	$k = 0,2$ – лето, $k = 0,7$ – зима,
6 этап, расчет КПД автон. солн. станц.	$\eta = \frac{P_{\text{н}}}{P_{\text{сб}}} = \frac{P_{\text{н}}\eta_1\eta_2}{P_{\text{н}}\eta_2 + P_{\text{зу}}}$	
7 этап, выбор автономного инвертора	Вся суммарная нагрузка приборов, подключаемых к инвертору, увеличивается, как минимум, на 30 %	

В результате научно-экспериментальных исследований, проведенных научными сотрудниками научно-производственного центра «Возобновляемые источники энергии» Государственного энергетического института Туркменистана, определены эффективные области применения разных видов фотоэлектрических солнечных станций в области возобновляемой энергетики, оптимальные режимы эксплуатации этих станций. На их основе разработаны пилотные проекты промышленных солнечных станций. В качестве примера рассмотрим пилотные проекты промышленных солнечных станций с мощностями 50 МВт и 8 МВт [5].

Известно, что солнечные электрические станции эффективно используются сегодня в системах энергоснабжения по трем основным «сценариям»:

- 1) работа в большой энергосистеме (on grid);
- 2) работа в локальной энергосистеме (off grid);
- 3) работа на локального или автономного потребителя (off grid).

Пилотные проекты промышленных солнечных станций с мощностями 50 МВт и 8 МВт разработаны для солнечных панелей с мощностью 250 Вт. Основные технические параметры фотоэлектрической станции с различными мощностями, работающей в большой энергосистеме, (off grid) показаны в таблице 4.

Сетевое строительство на территории Туркменистана в ближайшее время будет производиться в рамках реализации Национальной стратегии и крупных инвестиционных объектов и в интересах экспорта электроэнергии. На бытовых потребителей данные мероприятия существенного влияния не окажут (тарифы на электроэнергию не меняются). Рассмотрим возможность размещения ФСС в удаленных районах от центральной системы энергоснабжения, первоначально для варианта установки ФСС в частном сельском доме. При проектировании автономной ФСС сначала нужно составить список всех потребителей электроэнергии, выяснить их потребляемую мощность, напряжение и внести в список (таблица 2 и таблица 3). Учитывая вышеуказанный ресурс солнечной энергии, можно предположить, что число солнечных часов в сутках в зимний и летний периоды будут 5 и 12 часов соответственно. Для списка потребителей (таблица 2 и таблица 3) приблизительные энергозатраты в течении суток в этом случае составляет зимой 20–22 кВт·ч и летом 12–15 кВт·ч. При таких показателях среднемесячный результат составит порядка 660 кВт·ч, в год соответственно 7920 кВт·ч. Тогда ФСС должна вырабатывать в сутки зимой – $P = 22/5 = 4,4$ кВт; летом – $P = 22/12 = 1,8$ кВт.

Таблица 2 – Общее энергопотребление за сутки (летнее время)

№	Нагрузки	Напряжение, мощность	Мощность на основной шине, Вт	Время работы, ч/сутки	Энегопотреблен., Вт·ч/сут
1	Кондиционер	~220 В, 780 Вт	975	5,833	5687,5
2	Электрический чайник	~220 В, 1000 Вт	1250	0,25	312,5
3	СВЧ-печь	~220 В, 1200 Вт	1500	0,25	375
4	Холодильник	~220 В, 250 Вт	312,5	12	3750
5	Телевизор	~220 В, 150 Вт	187,5	4	750
6	Освещение зала	=24 В, 100 Вт	100	4	400
7	Освещение кухни и туалета	= 12 В, 50 Вт	50	5	250
8	Потребитель Н1	= 48 В, 120 Вт	150	5	750
9	Потребитель Н2	= 12 В, 90 Вт	112,5	3	337,5
	Итого		4637,5		12612,5

Таблица 3 – Общее энергопотребление за сутки (зимнее время)

№	Нагрузки	Напряжение, мощность	Мощность на основной шине, Вт	Время работы, ч/сутки	Энегопотреблен., Вт·ч/сут
1	Электрический камин	~220 В, 900 Вт	1125	13,833	15562,125
2	Электрический чайник	~220 В, 1000 Вт	1250	0,25	312,5
3	СВЧ-печь	~220 В, 1200 Вт	1500	0,25	375
4	Холодильник	~220 В, 250 Вт	312,5	12	3750
5	Телевизор	~220 В, 150 Вт	187,5	4	750
6	Освещение зала	= 24 В, 100 Вт	100	4	400
7	Освещение кухни и туалета	= 12 В, 50 Вт	50	5	250
8	Потребитель Н1	= 48 В, 120 Вт	150	5	750
9	Потребитель Н2	= 12 В, 90 Вт	112,5	3	337,5
	Итого		4787,5		22487,125

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Jumayev A. Distribution of solar energy potential on territory of Turkmenistan. //IOP Conf. Series: Earth and Environmental Sciences 1010 (2022) 012157.

2. Türkmenistanyň Prezidentiniň Karary bilen tassyklanan “Howanyň üýtgemegi barada Türkmenistanyň Milli strategiýasy (rejelen görnüşi). Aşgabat, 2019ý. 20

Türkmenistanyň Prezidentiniň 2019-njy ýylyň 23-nji sentýabrynda çykaran 1415-nji Karary bilen tassyklandy.

3. Türkmenistanyň Prezidentiniň Karary bilen tassyklanan «Türkmenistanda 2030-njy ýyla çenli gaýtadan dikeldilýän energetikany ösdürmek boýunça Milli Strategiýa. Aşgabat, 2020ý. Türkmenistanyň Prezidentiniň 2020-nji ýylyň 04-nji dekabrynda çykaran 2007-nji Karary bilen tassyklandy.

4. Gaýtadan dikeldilýän energiýa çeşmeleri hakynda Türkmenistanyň Kanuny. Aşgabat şäheri. 2021-nji ýylyň 13-nji marty.

5. Jumayev A., Atayev E. Pilot projects of industrial photovoltaic solar stations. // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Sciences 979 (2022) 012142.

Таблица 4. Технические параметры ФСС различной мощности

№	Оборудование	1 кВт		3 кВт		5 кВт		10 кВт		30 кВт	
		Тип	Колич.	Тип	Колич.	Тип	Колич.	Тип	Колич.	Тип	Колич.
1	Солнечный модуль	LHM30C-250W, 1640*992*40 mm, NW/GW 18/19rg	4 шт.	LHM30C-250W, 1640*992*40 mm, NW/GW 18/19rg	12 шт.	LHM30C-250W, 1640*992*40 mm, NW/GW 18/19rg	20 шт.	LHM30C-250W, 1640*992*40 mm, NW/GW 18/19rg	40 шт.	LHM30C-250W, 1640*992*40 mm, NW/GW 18/19rg	120 шт.
2	Инвертор	1000W Pure sine wave inverter. DC Input voltage 48V, AC Output voltage 230V, Frequency 50Hz	1 шт	3000W Pure sine wave inverter. DC Input voltage 48V, AC Output voltage 230V, Frequency 50Hz	1 шт	5000W Pure sine wave inverter. DC Input voltage 48V, AC Output voltage 230V, Frequency 50Hz	1 шт	5000W Pure sine wave inverter. DC Input voltage 120V, AC Output voltage 230V, Frequency 50Hz	2 шт	10kW Pure sine wave inverter. DC Input voltage 240V, AC Output voltage 230V, Frequency 50Hz	3 шт
3	Контроллер	System Voltage 24V or 48V auto detection, Max Charging current 20A, Max load current 20A	1 set	System Voltage 24V or 48V auto detection, Max Charging current 60A, Max load current 60A	1 set	System Voltage 24V or 48V auto detection, Max Charging current 100A, Max load current 100A	1 set	System Voltage 24V or 48V auto detection, Max Charging current 80A, Max load current 80A	2 set	System Voltage 240V, Max Charging current 120A, Max load current 120A	1 set
4	Аккумулятор	12V 120 Ah	4 шт	12V 120 Ah	12 шт.	12V 200 Ah	8 шт	12V 200 Ah	30 шт	12V 200 Ah	60 шт
5	Крепление панели	Aluminum	1000 watts	Aluminum	1000 watts	Aluminum	1000 watts	Aluminum	2000 watts	Aluminum	3000 watts
6	Соединительные разъемы	Mc4	2 set	Mc4	6 set	Mc4	10 set	Mc4	20 set	Mc4	40 set
7	PV кабель	4mm ²	80 m	4mm ²	120 m	4mm ²	150 m	4mm ²	200 m	4mm ²	500 m
8	DC распределительный ящик	–	–	–		–		In10 out1	2 set	In10 out1	2 set

МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕХАТРОННОГО МОДУЛЯ НА ОСНОВЕ СИНХРОННОГО СЕРВОДВИГАТЕЛЯ

*Кокудович Д. В., Сааков А. В., Прокопеня О. Н.
Брестский государственный технический университет,
г. Брест, Республика Беларусь*

В рассматриваемом мехатронном модуле используется синхронный серводвигатель Festo EMME-AS-40-S-LV-AMB в сочетании с шариковой винтовой передачей [1].



Рисунок 1 – Серводвигатель Festo EMME-AS-40-S-LV-AMB

Данный мехатронный модуль под управлением контроллера Festo CMMP-AS-C2-3A-M3 хорошо подходит для решения задач быстрого позиционирования. Однако динамические характеристики модуля существенно зависят от нагрузки и приведенного к валу двигателя момента инерции приводимого в действие механизма, что требует дополнительного исследования при использовании модуля для решения конкретных задач автоматизации [2]. Это, в свою очередь, требует соответствующего математического описания.

Принцип действия синхронно двигателя основан на взаимодействии магнитных полей статора и ротора. Вращающий момент синхронного двигателя зависит от угла θ между осями полюсов ротора и магнитного поля статора

$$M = M_m \sin \theta, \quad (1)$$

где M_m – максимальное значение момента.

Зависимость $M = f(\theta)$ называется угловой характеристикой синхронного двигателя.

На угловой характеристике располагается точка, соответствующая номинальному режиму работы, который характеризуется номинальными значениями момента M_H и угла θ_H . Обычно θ_H находится в пределах $30\text{--}35^\circ$, а M_H составляет примерно половину M_m . Это обеспечивает устойчивую работу при колебаниях нагрузки на валу двигателя. При увеличении момента до M_m значения θ дости-

гает 90° . Дальнейший рост нагрузки приводит к нарушению синхронного режима работы (двигатель выпадет из синхронизма).

Угол между осями полюсов статора и ротора

$$\theta = \alpha - \alpha_p, \quad (2)$$

где α – угол поворота магнитного поля статора;

α_p – угол поворота ротора.

Уравнение движения ротора

$$\ddot{\alpha}_p = \frac{M - M_C}{I_p + I_{п}}, \quad (3)$$

где M_C – момент сопротивления на валу двигателя;

I_p и $I_{п}$ – момент инерции ротора и приведенный к валу двигателя момент инерции механизма.

С учетом (1) и (2) уравнение (3) приводится к виду

$$\ddot{\alpha}_p = \frac{M_m \sin(\alpha - \alpha_p) - M_C}{I_p + I_{п}}. \quad (4)$$

Данное уравнение позволяет определить закон изменения угла поворота ротора при заданном законе изменения угла поворота магнитного поля статора, который можно получить интегрированием закона изменения угловой скорости магнитного поля.

Магнитное поле создается током в обмотке статора, которая обладает индуктивностью L и сопротивлением R . При этом изменение среднего значения тока при приложении напряжения U будет описываться уравнением

$$L \frac{di}{dt} + Ri = U. \quad (5)$$

Это уравнение аperiodического звена, которое имеет передаточную функцию

$$W(p) = \frac{1/R}{Tp+1}, \quad (6)$$

где $T = L/R$ – постоянная времени.

Таким образом, инерционность электромагнитных процессов в обмотке статора можно учесть введением в модель аperiodического звена с соответствующей постоянной времени.

Математическая модель, построенная на основе полученного уравнения движения ротора в приложении Simulink среды программирования Matlab, приведена на рисунке 2.

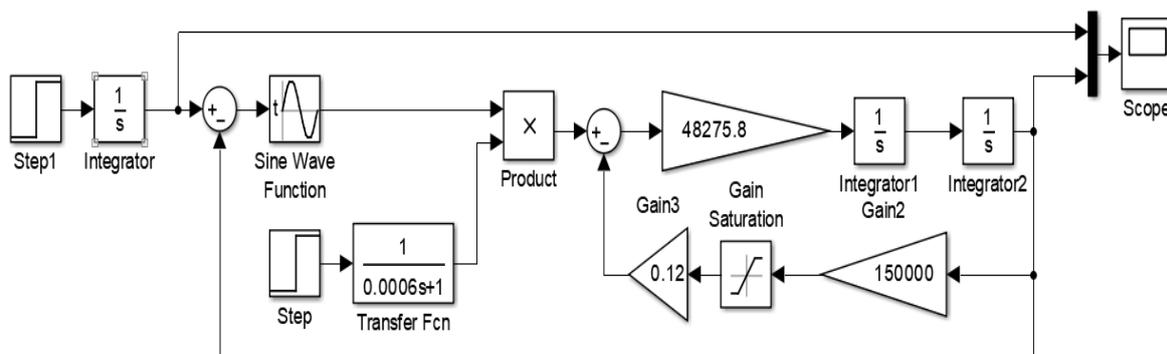


Рисунок 2 – Реализация математической модели в программе Matlab

Данная математическая модель отображает зависимость угла поворота ротора синхронного двигателя, а также зависимость угла поворота магнитного поля статора от времени. Данные зависимости выводятся на осциллограф.

Данная математическая модель позволяет исследовать влияние различных конструктивных параметров привода, а также момента сопротивления и закона управления на характер движения и качество работы привода. Модель позволяет выявить условия, при которых обеспечивается пуск двигателя в синхронном режиме (без проскальзывания ротора относительно поля).

Результаты моделирования приведены на рисунке 3 для начального момента после пуска двигателя, когда расхождение между углами наибольшее.

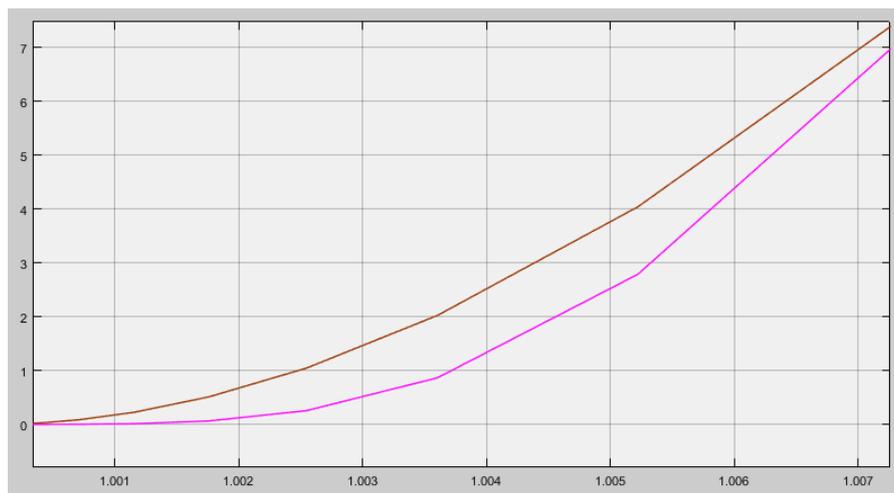


Рисунок 3 – Изменение углов поворота магнитного поля и ротора в начальный момент после пуска двигателя

Разность углов не превышает 1,57 рад (90°), следовательно, двигатель может сразу начать вращение с заданной скоростью в синхронном режиме. На рисунке 4 показан увеличенный фрагмент осциллограммы изменения углов поворота в установившемся режиме. Следует отметить, что имеют место колебания ротора относительно поля в процессе движения.

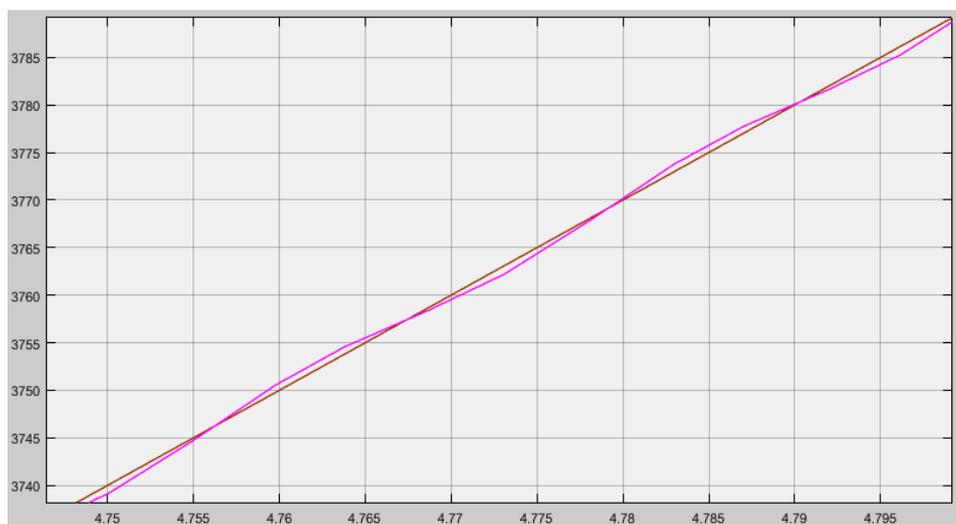


Рисунок 4 – Колебания ротора относительно поля (при отсутствии нагрузки)

При наличии нагрузки кривая изменения угла поворота ротора смещается вниз, т. е. появляется постоянное смещение полюсов ротора относительно поля, необходимое для создания момента согласно (4).

Таким образом, математическая модель позволяет выявить предельное значение скорости, на которой возможен пуск двигателя в синхронном режиме с места. При данной скорости разность углов поворота магнитного поля и ротора составит 90^0 (теоретически). Значение предельной скорости выявлялось при варьировании моментом сопротивления на валу двигателя и приведенным к валу двигателя моментом инерции привода. Зависимость предельной скорости от указанных параметров иллюстрируется рисунком 5.

Установлено, что при изменении момента сопротивления от нуля до максимального значения предельная скорость может уменьшаться в 2,2...2,7 раза в зависимости от момента инерции.

При изменении момента сопротивления от нуля до номинального значения предельная скорость уменьшается примерно на 10 %.

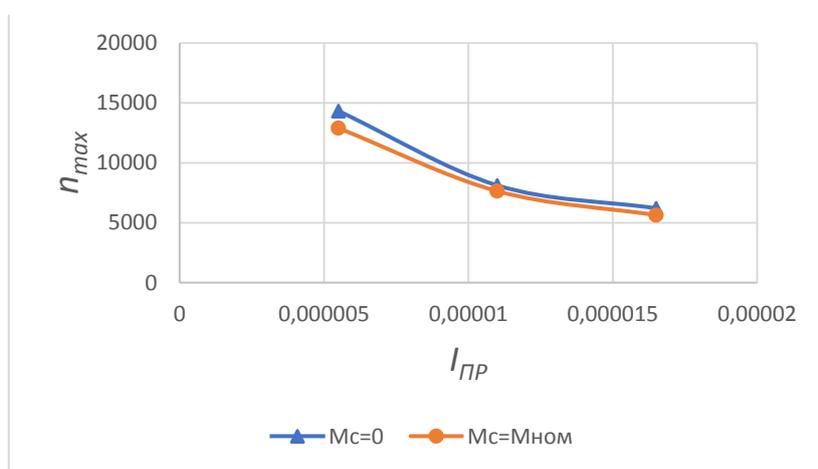


Рисунок 5 – Зависимость предельной скорости от момента инерции при $M_c=0$ и $M_c=M_{ном}$

Результаты показывают, что увеличение момента инерции в 3 раза по отношению к моменту инерции ротора (при наличии тормоза) снижает предельную скорость примерно в 2,3 раза независимо от момента нагрузки.

Таким образом, приведенный момент инерции механизма оказывает весьма существенное влияние на работу модуля, что необходимо учитывать при построении системы управления скоростью. Предложенная математическая модель позволяет проверить работу системы при конкретных значениях приведенного момента инерции и момента нагрузки.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Кокудович, Д. В. Мехатронные модули и мехатронные системы / Д. В. Кокудович, О. Н. Прокопеня // Новые технологии и материалы, автоматизация производства : сборник статей / Брестский государственный технический университет – Брест : Издательство БрГТУ, 2021. – С. 6–12.
2. Балковой, А. П. Теория и практика разработки прямого сервопривода / Сервопривод: Докл. науч. –метод. семинара. – М. : Издательство МЭИ, 2013. / А. П. Балковой // – 88 с.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИВОДА ШАГОВОГО КОНВЕЙЕРА НА ОСНОВЕ СИНХРОННОГО СЕРВОДВИГАТЕЛЯ

*Кокудович Д. В., Сааков А. В., Вабищевич Л. И., Прокопеня О. Н.
Брестский государственный технический университет,
г. Брест, Республика Беларусь*

В данной работе рассматривается двухприводный конвейер с двумя зубчатыми лентами (рисунок 1), который входит в состав высокопроизводительного роботизированного комплекса по фасовке глазированных сырков в коробку из гофрокартона. Задача состоит в обеспечении максимальной производительности, т. е. отработка шага перемещения должна осуществляться за минимальное время. Это требует соответствующего закона управления двигателем. В рассматриваемом приводе используется синхронный серводвигатель VCH2LD0433CF5C.

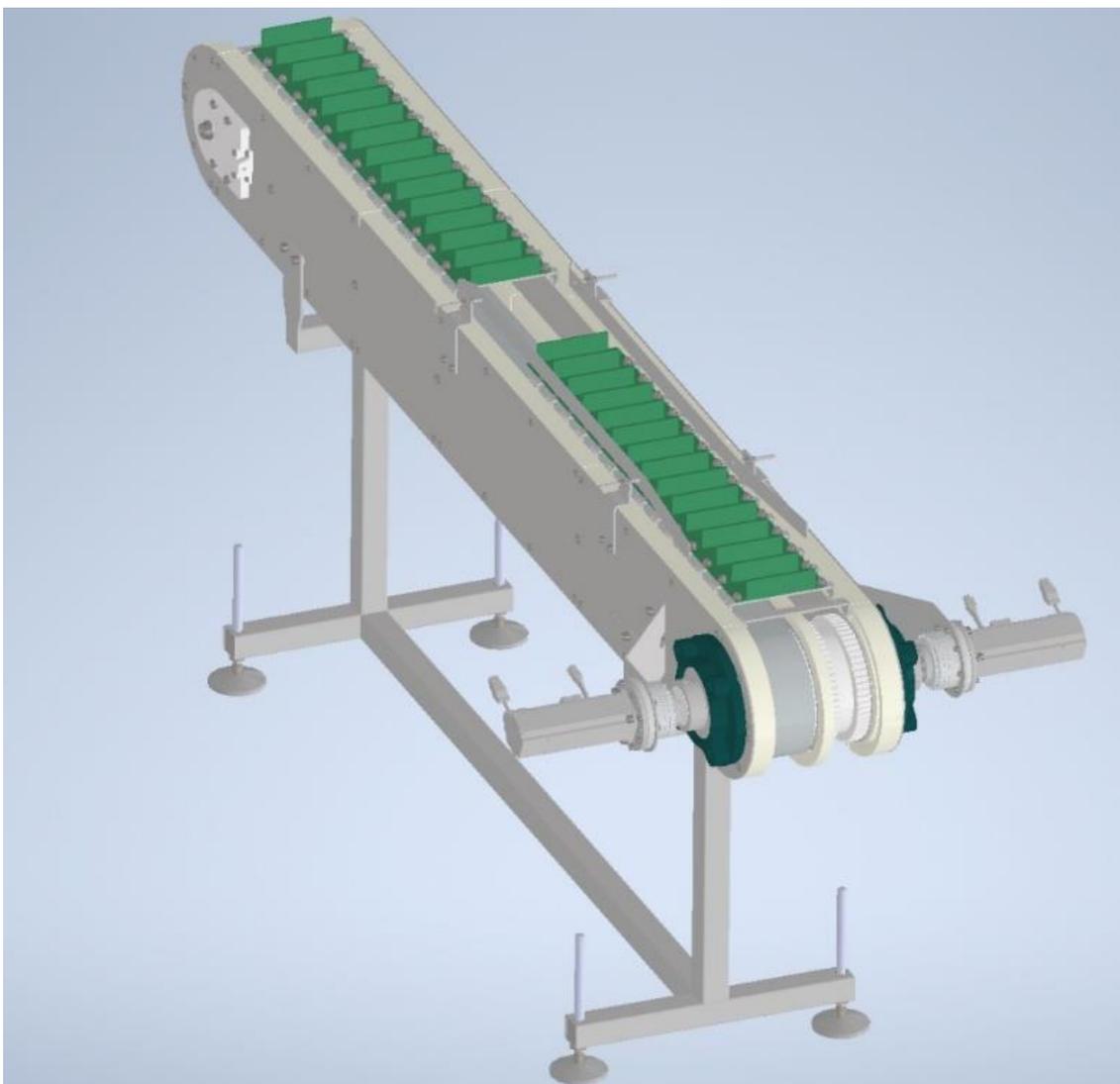


Рисунок 1 – Шаговый конвейер

Задача решается методами математического моделирования с использованием математической модели привода на основе синхронного серводвигателя [1].

Математическая модель, построенная на основе уравнения движения ротора в приложении Simulink среды программирования Matlab, приведена на рисунке 2.

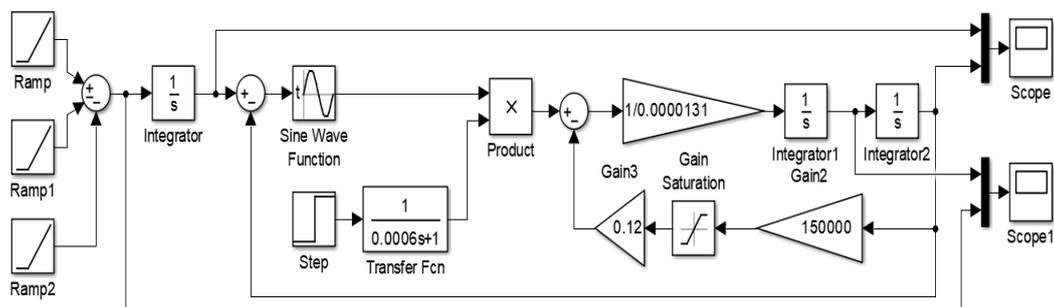


Рисунок 2 – Реализация математической модели в приложении Simulink программного пакета Matlab

Данная математическая модель отображает зависимость угла поворота ротора синхронного двигателя, а также зависимость угла поворота магнитного поля статора от времени. Данные зависимости выводятся на осциллограф. На второй осциллограф выводятся зависимости скоростей изменения указанных переменных.

Данная математическая модель позволяет исследовать влияние различных конструктивных параметров привода, а также момента сопротивления и закона управления на характер движения и качество работы привода.

Установлено [2], что использование трапецеидального закона изменения скорости позволяет существенно повысить производительность. Однако при этом возникает задача выбора приемлемого ускорения, которое бы обеспечивало выход на предельную скорость при устойчивой работе двигателя.

Три генератора линейного сигнала на входе модели позволяют сформировать трапецеидальный закон изменения скорости. На первом этапе движение осуществляется с постоянным ускорением до достижения номинальной скорости, затем движение с номинальной скоростью и движение с отрицательным ускорением той же величины до остановки.

С помощью данной модели определено максимальное угловое ускорение, при котором сохраняется работа двигателя в синхронном режиме. Оно составляет $\varepsilon = 25000 \text{ c}^{-2}$. При большем ускорении двигатель выпадает из синхронизма. Результаты моделирования при движении с указанным ускорением показаны на рисунках 3, 4.

На рисунке 3 приведены кривые изменения скорости ротора, а также заданной скорости (скорости вращения поля), которая изменяется по трапецеидальному закону. Скорость ротора имеет колебательную составляющую, которая не отражается существенно на отработке заданного перемещения.

Перемещение ротора приведено на рисунке 4. Кривая углового перемещения имеет параболические участки в начале и в конце и линейный участок посередине. Разность углов на участках разгона и торможения не превышает 1,57 рад (90°), следовательно, двигатель работает в синхронном режиме.

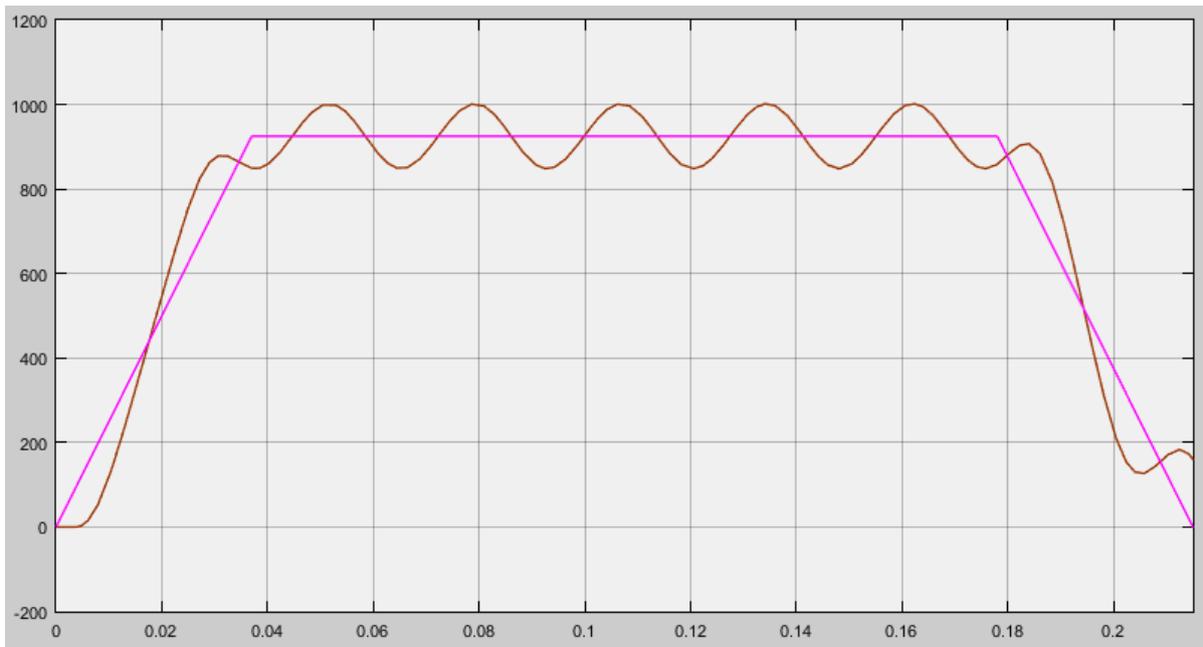


Рисунок 3 – Изменение скоростей вращения магнитного поля и ротора

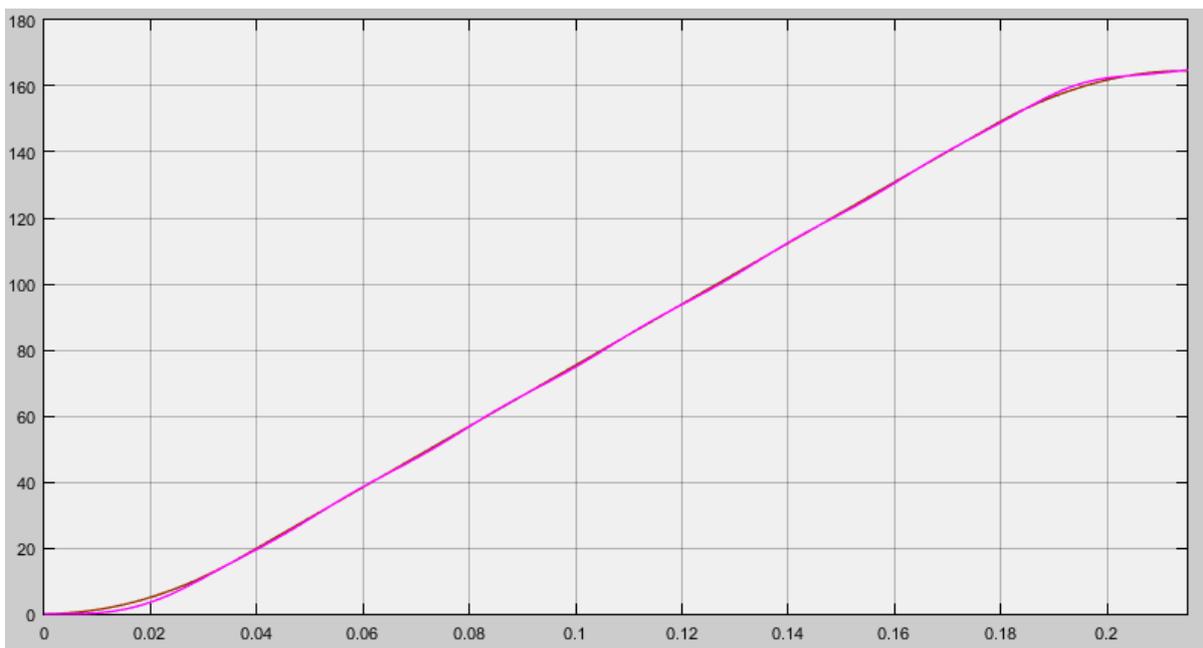


Рисунок 4 – Изменение углов поворота магнитного поля и ротора

Результаты моделирования показывают, что угловой поворот вала двигателя на 167,6 рад выполняется за 0,215 с. В то же время при загруженном конвейере предельная скорость при вращении с места в синхронном режиме составляет 0,56 от номинальной, что обеспечивает время отработки такого же перемещения 0,334 с. Таким образом, использование трапецеидального закона управления с предельным ускорением позволяет уменьшить время отработки шага в 1,55 раза.

С помощью математической модели определены значения предельной скорости двигателя для различных значений передаточного отношения редуктора.

При этом вычислялись значения приведенного момента инерции привода и требуемой скорости вращения двигателя. Результаты расчета представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты расчета предельной скорости

i	$I_{пр}, кг*м^2$	$\Omega_{пред}, рад/с$	$\Omega_{треб}, рад/с$	$\Omega_{пред}/ \Omega_{треб}$
1	0,021228	18	8,42	2,13
5	0,000884	94	42,1	2,23
10	0,000248	172	84,2	2,04
20	0,000089	260	168,4	1,54
40	0,000049	318	336,8	0,94

Приведенные результаты показывают, что по мере уменьшения передаточного отношения редуктора увеличивается приведенный момент инерции, и как следствие, снижается предельная скорость вращения в синхронном режиме. Одновременно снижается требуемая скорость двигателя, обеспечивающая заданную скорость выходного звена.

В последнем столбце приведено соотношение скоростей, которое характеризует резерв повышения производительности конвейера за счет возможного увеличения скорости двигателя. В этом смысле наибольшими возможностями обладает привод с передаточным отношением редуктора, близким к 5. Он позволяет повысить производительность конвейера по отношению к проектной в 2,23 раза за счет повышения скорости двигателя до предельной. Несколько меньшими возможностями обладает безредукторный привод.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Кокудович, Д. В. Мехатронные модули и мехатронные системы / Д. В. Кокудович, О. Н. Прокопеня // Новые технологии и материалы, автоматизация производства : сборник статей / Брестский государственный технический университет – Брест : Издательство БрГТУ, 2021. – С. 6–12.

2. Сааков, А. В. Система управления приводом шагового конвейера / А. В. Сааков, О. Н. Прокопеня, Л. И. Вабищевич // Новые технологии и материалы, автоматизация производства : сборник статей / Брестский государственный технический университет – Брест : Издательство БрГТУ, 2021. – С. 17–20.

УДК 681.5.09

РАСЧЁТ НАДЁЖНОСТИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ С БОЛЬШИМ КОЛИЧЕСТВОМ ОБЪЕКТОВ

Королёв А. А., Михновец А. Н., Карпович Д. С.

*Белорусский государственный технологический университет,
ул. Свердлова 13а, 220006, г. Минск, Беларусь*

Внедрение достижений науки и техники, современных технологий характеризуется созданием сложных систем и устройств с высоким уровнем автоматизации, выполняющих интеллектуальные, адаптивные функции управления в космической и авиационной технике, тепловой и атомной энергетике, химической, нефте-

химической, нефтегазодобывающей, металлургической, обрабатывающей и других отраслях промышленности и транспорта. Успешное решение задач управления, связанных с повышением эффективности производств, поставило в качестве первоочередной проблему обеспечения высокой надёжности таких систем и технических средств. Актуальность и важность этой проблемы обусловлена существенным ущербом, который может возникнуть в опасных производствах, производствах с большими единичными мощностями, а также на производствах с системами с большим количеством вычислительных объектов.

Основными причинами, определяющими повышенное внимание к проблемам надёжности, являются:

- повышение сложности устройств и появление сложных систем;
- более медленный рост уровня надёжности комплектующих элементов по сравнению с ростом числа элементов в устройствах и системах;
- повышение важности выполняемых элементами и устройствами функций и, как следствие этого, повышение требований к их надёжности;
- усложнение условий эксплуатации систем.

Главной целью является расчёт надёжности невозстанавливаемых систем, так как при последовательном соединении элементов (рисунок 1), которое является основным, при отказе любого из элементов отказывает вся система. При анализе надёжности таких систем предполагается, что отказ любого из элементов несёт независимый и случайный характер и не нарушают работоспособности других элементов в системе. Основными понятиями при расчёте надёжности системы управления являются вероятность безотказной работы, интенсивность отказов.

Вероятность безотказной работы связана с функцией распределения времени безотказной работы соотношением:

$$P_{(t)} = 1 - Q_{(t)}, \quad (1)$$

где $P_{(t)}$ – вероятность безотказной работы объекта;

$Q_{(t)}$ – функция распределения времени безотказной работы, которая представляет собой вероятность появления отказа в течение времени t [1].



Рисунок 1 – Последовательное соединение элементов системы

Для нахождения интенсивности отказов стоит в первую очередь определить величину частоты отказов. Она будет равна

$$a_{(t)} = \frac{dQ_{(t)}}{dt} = -\frac{dP_{(t)}}{dt}. \quad (2)$$

Между вероятностью безотказной работы, вероятностью появления отказа и частотой отказов существуют следующие зависимости:

$$Q_{(t)} = \int_0^t a(x)dx; \quad P_{(t)} = 1 - \int_0^t a(x)dx. \quad (3)$$

Так как интенсивность отказов – это условная плотность вероятности возникновения отказа объекта, определяемая при условии, что до рассматриваемого момента времени отказ не возник, то в соответствии с данным определением

$$\lambda_{(t)} = \frac{a_{(t)}}{P_{(t)}}. \quad (4)$$

Вероятность $\lambda(t)dt$ характеризует вероятность отказа системы или элемента за интервал $(t, t + dt)$, взятых из группы элементов или систем, которые остались работоспособными к моменту времени t . В соответствии определяется взаимосвязь между вероятностью безотказной работы и интенсивностью отказов. Интегрируя выражение 4, получаем:

$$-\int_0^t \lambda(x)dx = \ln P_{(t)}, \text{ откуда } P_{(t)} = \exp\left[-\int_0^t \lambda(x)dx\right]. \quad (5)$$

Данная зависимость 5 в общем виде может рассматриваться как основной закон надёжности. И, если $\lambda_{(t)} = \lambda = \text{const}$, то

$$P_{(t)} = e^{-\lambda t} \text{ и } a_{(t)} = \lambda * e^{-\lambda t}. \quad (6)$$

При соединении элементов системы по схеме, приведённой на рисунке 1, условие работоспособности нашей системы – работоспособность элементов $\overline{1, n}$. Тогда вероятность безотказной работы системы при основном (последовательном) соединении элементов равна

$$P_{(t)} = \prod_{i=1}^n P_i(t), \quad (7)$$

где n – число элементов в системе;

$P_i(t)$ – вероятность безотказной работы i -го элемента.

Рассмотрим простой пример. Система состоит из $N = 5$ блоков. Надежность блоков характеризуется вероятностью безотказной работы в течение времени t , которая равна: $p_1(t) = 0,95$; $p_2(t) = 0,96$; $p_3(t) = 0,99$; $p_4(t) = 0,975$; $p_5(t) = 0,955$. Тогда вероятность безотказной работы системы определяется как:

$$P_{(t)} = \prod_{i=1}^n P_i(t) = 0,95 \cdot 0,96 \cdot 0,99 \cdot 0,975 \cdot 0,955 = 0,858.$$

Также существует резервное подключение элементов системы, или параллельное (рисунок 2). Оно используется в основном для того, чтобы повысить надежность работы системы, особенно в тех случаях, когда подсоединённых элементов большое количество. Виды резервирования подразделяются на несколько основных:

- общее;
- раздельное;
- смешанное.

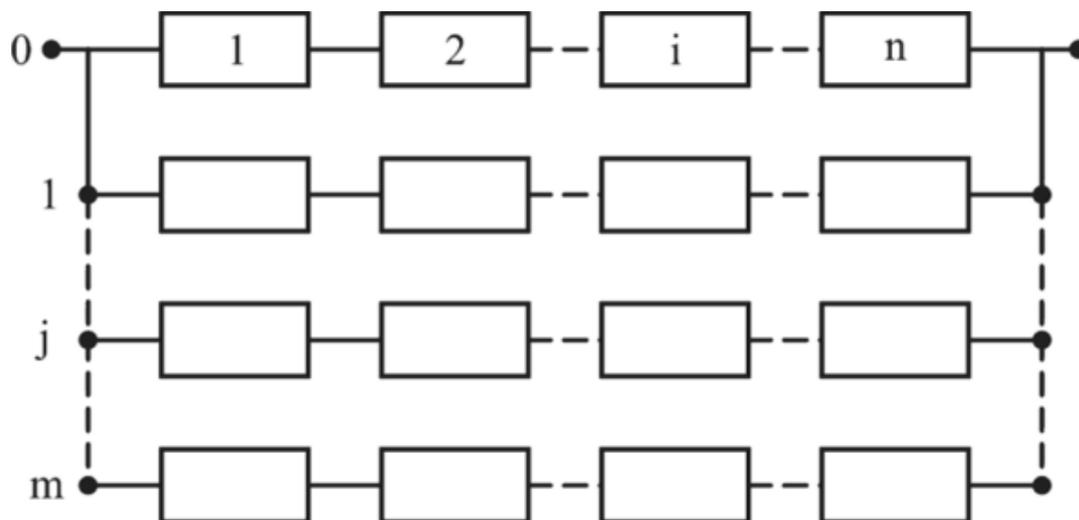


Рисунок 2 – Пример схемы общего резервирования

При проведении общего резервирования резервируется вся система. При этом все элементы работают на тех же настройках и в тех же режимах, и система является работоспособной до тех пор, пока работоспособна хотя бы одна из резервных веток системы. Данный способ можно назвать одним из самых надёжных и простых, но при этом он также является самым затратным, так как из чем большего количества элементов состоит наша система, то, соответственно, требуются гораздо большие затраты на оборудование и поддержание её работоспособности. Соответственно, он применяется при небольшой кратности резервирования.

Также есть различия по способу включения резервных элементов. Различают постоянное резервирование и резервирование замещением. В первом случае подключенные резервные элементы находятся в одинаковом режиме с основным и подключены к нему в течение всего времени работы. При резервировании замещением резервный элемент подключается вместо основного только в том случае, когда он вышел из строя и, соответственно, выполняет его функции [2].

Расчёт вероятности отказа системы с постоянным включением резерва имеет такой вид:

$$Q(t) = \prod_{j=0}^m Q_j(t) = \prod_{j=0}^m [1 - P_j(t)]. \quad (8)$$

Безотказность работы j -й резервной цепи, содержащей n элементов, находится как:

$$P_j(t) = \prod_{i=1}^n P_{ij}(t). \quad (9)$$

На основе выражений 8 и 9 получаем:

$$P_{(t)} = 1 - \prod_{j=0}^m \left[1 - \prod_{j=0}^m P_{ij}(t) \right]. \quad (10)$$

Таким образом, при расчёте надёжности систем учитываются ряд критериев, такие как интенсивность отказов и частота отказов системы. Однако данные показатели применимы в первую очередь для последовательной структуры системы, которая в области работы с системами управления самая ненадёжная, так как при большом количестве элементов система выйдет из строя при прекращении работы хотя бы одного из них. В итоге проблема надёжности систем с большим количеством объектов может быть решена за счёт резервирования некоторых объектов, надёжность которых в системе наименьшая. Это значительно повысит надёжность работы системы при меньших затратах на оборудование, но потребует больших расчётов, в особенности если резервные и основные объекты работают в разных режимах.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Шкляр, В. Н. Надёжность систем управления: учебное пособие / В. Н. Шкляр; Томский политехнический университет. – Томск : Изд. Томского политехнического университета, 2009. – 126 с.
2. «Расчёт надёжности неремонтируемых систем при проектировании» [Электронный ресурс]. – Электронные данные. – Режим доступа: <https://studylib.ru>.

УДК 658.512.2

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ВЫБОРА ТИПОРАЗМЕРА ТОКАРНОГО РЕЗЦА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ РЕЖИМОВ И УСЛОВИЙ ОБРАБОТКИ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

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

Объектом исследования выступает автоматизация технологической подготовки машиностроительного производства.

Целью работы является выявление возможности автоматизированного выбора типоразмера токарного проходного резца на этапе проектирования технологических операций механической обработки.

В ходе выполнения работы был разработан и апробирован алгоритм выбора типового токарного резца из подготовленной базы данных, с учетом заданных

условий обработки. Определены входные переменные параметры. Особенности алгоритма решения поставленной задачи являются:

- возможность ввода исходной информации параллельными информационными потоками;
- входные переменные параметры для выполнения расчетов, такие как, элементы режимов резания, группа обрабатываемого материала, материал режущей части резца;
- по результатам автоматизированного расчета для каждого массива входных параметров на экран выводятся как промежуточные результаты, так и рекомендации по выбору определенного режущего инструмента, наиболее подходящего для выполнения обработки при заданных условиях.

Одним из главных факторов, определяющих характер и результаты процесса резания, является теплота, образующаяся в зоне резания. Законы теплообразования объясняют целый ряд явлений, связанных со стойкостью инструмента и качеством обработанной поверхности.

Общая мощность тепловыделения при резании равна эквивалентной механической работе деформирования материала и работе сил трения на контактных площадках инструмента, т. е.

$$W = P_z \cdot v, \quad (1)$$

где P_z – главная составляющая силы резания, Н;

v – скорость резания, м/мин.

Установлено, что почти вся механическая работа резания (99,5 %) переходит в теплоту.

$$Q = Q_{\text{деф}} + Q_{\text{тр.п.п.}} + Q_{\text{тр.з.п.}}, \quad (2)$$

где $Q_{\text{деф}}$, $Q_{\text{тр.п.п.}}$, $Q_{\text{тр.з.п.}}$ – соответственно мощности тепловыделения источников, возникающих как результат перехода в теплоту работы деформирования, работы сил трения на передней и задней поверхностях режущего клина.

Если в технологической системе комбинируется несколько видов энергии, кроме основной (механической) работы резания, то формула (2) принимает вид:

$$Q^+ = Q_{\text{деф}} + Q_{\text{тр.п.п.}} + Q_{\text{тр.з.п.}} + Q_{\text{в}}, \quad (3)$$

где $Q_{\text{в}}$ – теплота от дополнительных (внешних) источников.

Все источники тепловыделения при резании являются трехмерными. Учет трехмерности источников приводит к существенному усложнению математических моделей, используемых при теплофизическом анализе процесса резания. Поэтому часто при теплофизическом анализе их полагают двумерными (плоскими), что допускает определённые погрешности. При этом практическая точность расчетов снижается незначительно. При высоких скоростях резания форма источников тепловыделения также стремится к двумерной конфигурации.

Для удобства расчетов и упрощения анализа термической напряжённости в зоне стружкообразования технологическую систему обычно разделяют на три части – заготовку, стружку, режущий клин. Такое разделение позволяет учитывать тепловые потоки, проходящие через каждый компонент технологической системы, суммировать их и представлять в виде итоговых тепловых потоков.

Из итоговых тепловых потоков наибольшую плотность имеют потоки, проходящие через условную плоскость сдвига (в среднем в 2...5 раз их плотность больше, чем двух других).

выше жесткости заготовки, по окончании обработки на заготовке возникнет вогнутость. Если же наоборот, жесткость заготовки будет выше жесткости инструментального блока, поверхность станет бочкообразной.

Если считать тепловой поток равномерно распределенным по всему инструменту, для токарного резца тепловую деформацию можно укрупненно определить по формуле:

$$\Delta L = 10 \cdot C \cdot \left(\frac{L}{F} \right) \cdot \sigma_B^{-1} \cdot (t \cdot s)^{0,75} \cdot v^{0,5} \cdot \left(1 - e^{-\frac{T_0}{4}} \right), \quad (4)$$

где C – поправочный коэффициент, в зависимости от материала державки $C = 40 \dots 50$; L – вылет резца, мм; F – площадь поперечного сечения державки резца, мм²; σ_B – предел прочности материала державки, МПа, T_i – время работы инструмента с учетом времени вспомогательных ходов, мин.

Общая зависимость температурной деформации резца от времени его непрерывной работы показана на рисунке 3.

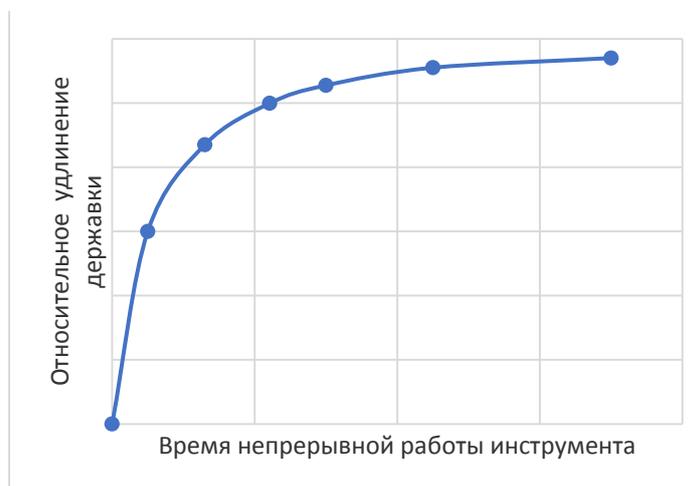


Рисунок 3 – Зависимость температурной деформации токарного резца от времени непрерывной работы

Поскольку одной из составляющих общей погрешности обработки является погрешность, связанная с температурными деформациями компонентов технологической системы, в условиях автоматизированного производства очень важно, чтобы технологическая система как можно дольше находилась в режиме стационарного теплообмена. В этом случае стабилизируются погрешности обработки, связанные с температурными деформациями компонентов системы. Как видно из формулы (4), величина термической деформации токарного резца зависит от принятых режимов резания и габаритных размеров державки инструмента.

Смещение настроечной точки инструмента отсчитывается от определенной базы в установленном направлении. Обычно систему отсчета связывают с номинальной обрабатываемой поверхностью. Для удобства за поверхность отсчета также можно принимать поверхность, расположенную эквидистантно относительно номинальной. Например, при анализе погрешностей обработки поверхностей вращения за поверхность отсчета принимают идеально расположенную ось детали.

Укрупнённо можно принять величину погрешности, вызванной температурными деформациями приблизительно 10 %...15 % от общей погрешности обработки. Если исходить из того, что общая погрешность обработки $\Sigma\Delta$ не должна превышать величину допуска $\delta_{обр}$ на обрабатываемый размер, то с учётом гарантированного обеспечения точности обрабатываемой поверхности, для формирования алгоритма расчета ограничим величину общей погрешности обработки $\Sigma\Delta \leq 0,5\delta_{обр}$. Тогда с учётом принятых допущений общая погрешность от тепловых деформаций не должна превышать величины $\Sigma\Delta_{ТЕПЛ} \leq (0,15 \cdot 0,5\delta_{обр})$, т. е. $\Sigma\Delta_{ТЕПЛ} \leq 0,075\delta_{обр}$.

Свяжем задачу оптимизации процесса резания с выбором наиболее рациональных режимов обработки, приемлемых для определенных условий, а также с подбором габаритов державки резца с точки зрения снижения металлоемкости. Для поиска решений с несколькими взаимозависимыми входными данными выделим формальные параметры, и автоматизируем расчет, целью которого будет разработка алгоритма определения тепловой деформации токарного резца и формализация выбора размеров державки инструмента из стандартного ряда для обработки наружной цилиндрической поверхности с заданной точностью.

При разработке программы учитываем особенности изменения температуры резания в зависимости от обрабатываемого материала и режимов обработки. Поскольку одной из важнейших характеристик инструментальных материалов является их теплостойкость, то при выборе подходящего для обработки инструментального материала необходимо соизмерить его красностойкость с расчётной температурой резания.

Представим алгоритм решения задачи оптимизации в виде блок-схемы, показанной на рисунке 4.

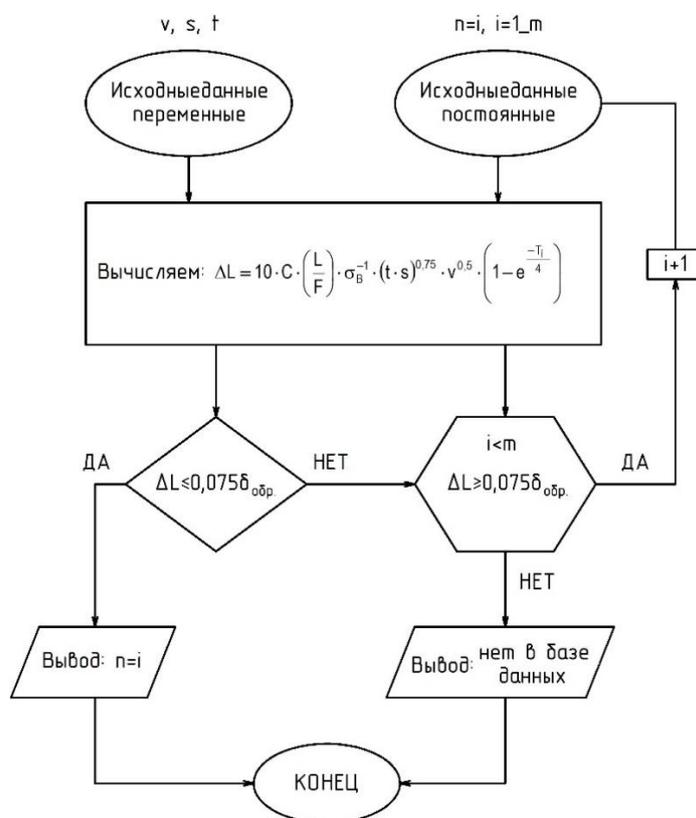


Рисунок 4 – Блок-схема решения задачи оптимизации выбора инструмента

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Резников А. Н. Тепловые процессы в технологических системах / А. Н. Резников, Л. А. Резников. – М. : Машиностроение, 1990. – 288 с.: ил.
- 2 Теория резания. Физические и тепловые процессы в технологических системах: учеб. для вузов. / Ящерицын П. И. [и др.]. – Минск : Высшая школа, 1990. – 512 с.
3. Проектирование технологий машиностроения на ЭВМ: учебник для вузов / О. В. Таратынов [и др.]; под ред. О. В. Таратынова. – М. : МГИУ, 2006. – 519 с.
4. Справочник технолога-машиностроителя. / Под ред. А. М. Дальского. М. : Машиностроение –1, 2001. – Том 2 – 944 с.

УДК 658.5.017.7

ПРОБЛЕМЫ РАСПОЗНАВАНИЯ ЗВУКОВОЙ ИНФОРМАЦИИ В НЕЙРОСЕТЕВОЙ СИСТЕМЕ ОПОВЕЩЕНИЯ ДЛЯ ЛЮДЕЙ С ОГРАНИЧЕННЫМИ СЛУХОВЫМИ ВОЗМОЖНОСТЯМИ

Рязанцева Н. В., Голдобина Т. А., Минин В. Е.

*Белорусский государственный университет транспорта,
г. Гомель, Республика Беларусь*

Одним из наиболее активно развивающихся направлений автоматизации в современных условиях являются технологии удаленного управления, такие как умный дом (англ. smart home). Домашняя автоматизация, способствующая повышению уровня комфорта и удобства жизни человека, – весьма гибкая система, которая предоставляет пользователю возможность самостоятельно конструировать, настраивать и дистанционно контролировать своё жизненное пространство в зависимости от насущных потребностей.

Однако системы оповещения, входящие в состав большинства современных систем домашней автоматизации общего пользования, не могут быть полнофункционально применены людьми с ограниченными возможностями. Несмотря на существующие мировые тенденции повышения комфортности для инвалидов, в настоящее время на рынке аппаратного и программного обеспечения представлено очень мало продуктов для слабослышащих или слабовидящих.

Авторами ведется разработка нейросетевой системы, которая в реальном времени анализирует окружающую обстановку, определяет источники и характер звуков, а также классифицирует данные звуки по категориям с дальнейшим уведомлением пользователя. Так как основными пользователями системы являются люди с ограниченными возможностями по слуху, категории звуков включают в себя основные бытовые события с возможностью дополнительного обучения (плач ребенка, звонок в дверь, звуковые уведомления бытовой техники и т. д.) на усмотрение пользователя.

Распознавание звуков является нетривиальной задачей, поскольку сложность сопоставления звуков в различных окружениях, а также иные источники шума способны существенно исказить звуковую волну, в связи с чем значи-

тельно увеличатся затраты на ее идентификацию. Существующие методы шумоподавления способны компенсировать шумы от сторонних объектов, однако их эффективность сильно варьируется от области применения.

Разрабатываемая система включает в себя аппаратную часть, программный модуль обработки звуков, программный модуль для формирования и обмена уведомлениями, а также приложение для мобильного телефона для обработки данных уведомления. Для решения поставленной задачи система должна обладать возможностью идентификации звука и сопоставления записанной звуковой волны с готовыми паттернами. Отсюда можно выделить несколько подзадач, которые требуется рассмотреть: получение оцифрованной звуковой волны, математическая обработка данных для получения цифрового отпечатка, обучение нейронной сети готовым набором цифровых последовательностей, верификация обученной нейронной сети. Качество обработки данных имеет ключевое значение и непосредственно влияет на результат распознавания, т. к. малое количество отсчетов при оцифровке сигналов или низкая разрешающая способность АЦП негативно скажутся на качестве выборки, что ухудшит качество распознавания нейронной сети в целом. Структурная схема системы представлена на рисунке 1.

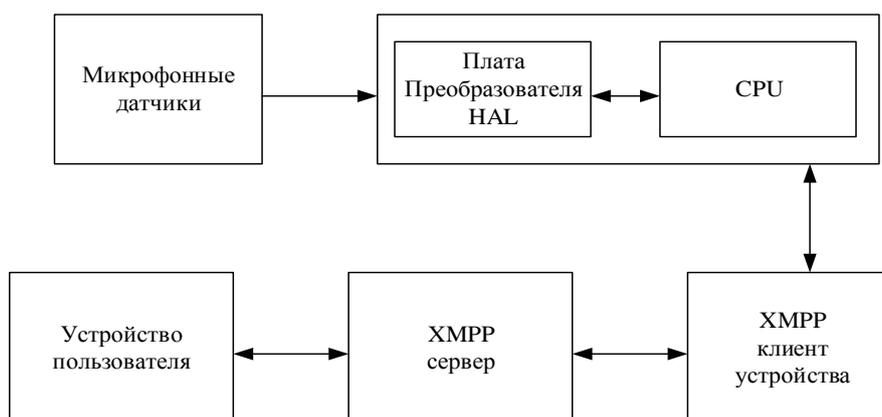


Рисунок 1 – Структурная схема системы идентификации звуков

Аппаратная часть разрабатываемого комплекса представлена микрофонным модулем, подключенным к микропроцессорной системе под управлением ОС Linux. В основе модуля лежит микросхема WM8960, которая представляет собой аудиокодек с низким энергопотреблением. Чтобы обеспечить полный программный контроль над всеми функциями, WM8960 использует двухпроводной интерфейс управления. Он полностью совместим и является идеальным партнером для широкого спектра стандартных микропроцессоров, контроллеров и DSP. Неиспользуемые схемы можно отключить с помощью программного обеспечения для экономии энергии. В качестве микропроцессорного модуля был выбран Raspberry Pi 3 Model B – полноценный бесшумный компьютер размером с банковскую карту с 64-битным четырёхядерным процессором ARM Cortex-A53 на однокристальном чипе Broadcom BCM2837 [3].

Задачи, которые выполняет ПО, – это аппаратный захват аудиосигнала, предобработка, сопоставление с образцами, принятие решения, формирование уведомления, работа с пользователем. Разработка программного обеспечения вы-

полнена на языке Python. Программное обеспечение включает в себя управляющий модуль, написанный на языке Python, отвечающий за непрерывный захват и предобработку аудиопотока, полученного непосредственно с микрофонных датчиков. Также в состав ПО входит модуль цифровой обработки и распознавания, в его зону ответственности входит формирование цифровых отпечатков, передача их в нейронную сеть. За отправку уведомлений отвечает модуль обмена, на котором реализован клиент XMPP IoT.

Разрабатываемая система непрерывно фиксирует акустическое окружение посредством HAL-модуля, при этом ключевыми параметрами являются быстродействие и малая ресурсоемкость подсистемы захвата. Обработка через аудиострим непосредственно с HAL не должна вносить задержку в обработку, превышающую 100 мс, применение быстрого преобразования Фурье и анализа превышения порога звука может исключить подсистему предобработки в некоторых пороговых случаях и сформировать уведомление непосредственно на этапе захвата. Предобработка включает в себя шумоподавление, спектральный анализ, формирование отпечатка аудиосигнала, который в дальнейшем будет сопоставлен с готовыми образцами, полученными на этапе обучения системы. Если аудиосигнал по отпечатку удалось идентифицировать, система формирует уведомление для пользователя, которое включает в себя временные отметки, место и характер сигнала. Сформированное уведомление высылается пользователю через IOT-XMPP клиент, сконфигурированный заранее.

При разработке мобильного приложения использовался готовый стандарт для передачи сообщений. В качестве транспорта для передачи данных был использован протокол XMPP. Данное решение обладает рядом преимуществ, в число которых входят: открытость программного кода для написания клиентов и серверных модулей, высокая масштабируемость, наличие плотной сети преднастроенных серверов. Клиентские XMPP приложения для Android и IOS также широко распространены, что позволяет значительно снизить стоимость разработки прототипа. В основе механизма обмена лежит XMPP (Extensible Messaging and Presence Protocol) – расширяемый протокол обмена сообщениями и информацией о присутствии, основанный на XML, свободный для использования протокол для мгновенного обмена сообщениями и информацией о присутствии в режиме, близком к режиму реального времени. Изначально спроектированный легко расширяемым протокол помимо передачи текстовых сообщений поддерживает передачу голоса, видео и файлов по сети. Когда серверное и клиентское приложения запущены, пользователь имеет возможность конфигурации сервера через клиентскую часть простыми командами чата, это позволяет вручную конфигурировать интервалы уведомлений, приходящих со стороны программно-аппаратного комплекса, а также конфигурировать типы событий, которые могут активировать те или иные уведомления. Данный механизм основан на классе XMPP нотификатор и может быть промасштабирован при переходе от прототипа к разработке реального устройства.

В разрабатываемой системе для получения аудиоданных используется два микрофона, при захвате аудио формируется два независимых аудиоканала, которые в дальнейшем формируют двумерный numpy-массив, участвующий в эталонном распознавании.

В структуру модуля цифровой обработки и распознавания входят искусственная нейронная сеть (ANN), реализация поставленной задачи включает в себя формирование структуры ANN, обучение тестовыми последовательностями, а также последующую верификацию. Построение структуры ANN выполнено посредством библиотеки PyTorch, использование данной библиотеки обусловлено ее доступностью и большим объемом обучающего материала.

В основе нейронной сети лежит последовательная модель на 4 реляционных слоя с тремя выходными нейронами, в качестве эталонов использованы стереозаписи плача ребенка в различном окружении, звонка колокольчика и звонка в дверь.

При обучении модели были использованы различные комбинации входных наборов, сводная информация приведена в таблице 1.

Таблица 1 – Ключевые параметры результатов обучения

Входной набор	Эпохи	Точность	Границы срабатывания	Задержка преобразования
Спектрограмма	128	68 %	0.74 сек	0.2 сек
Спектрограмма+ активные фильтры	128	78 %	0.74 сек	1.2 сек
Спектрограмма + MFCC	128	74 %	1.4 сек	0.5 сек
Спектрограмма + хроматограмма	128	79 %	1.3 сек	0.4 сек
Спектрограмма + MFCC + хроматограмма	128	86 %	1.5 сек	1.4 сек
Спектрограмма + MFCC + активные фильтры	128	88 %	2.0 сек	1.9 сек

При настройке модели в зависимости от комбинации входных наборов для количества эпох равных 128 средняя точность составила 78.8 %, что является достаточно хорошим результатом. Однако, при увеличении объема входных данных, существенно увеличивается время обработки, например, время срабатывания при анализе спектрограммы отличается от времени срабатывания полного набора данных с применением активных фильтров в 5.2 раза. В данной ситуации также немаловажно учитывать производительность конечной системы. По итогу обучения максимальная эффективность для соотношения точность – производительность была получена для набора спектрограмма + хроматограмма (точность 79 %, задержка 1.7 секунды).

Исходя из полученных данных, можно предположить, что концепция динамически конфигурируемой нейронной сети как продукта для конечного пользователя не является жизнеспособной – разбежка результатов даже для изолируемого набора данных требует оптимизации и системного подхода к обучению сети. Оптимальным решением представляется создание системы с жестко запрограммированным программным обеспечением, включающего максимальное количество распознаваемых паттернов. Для расширения количества идентифицируемых объектов потребуются дополнительная разработка, поэтому для исходного ПО нужна система версионирования, поддержка обновлений, а также возможность восстановления исходной версии программного обеспечения. Перспективным направлением дальнейшей деятельности может быть применение, адаптация и комбинирование алгоритмов распознавания, входящих в со-

став библиотек системы компьютерной математики Matlab и языка программирования R.

Таким образом, подход к идентификации звуков посредством распознавания ресурсами нейронной сети выглядит реалистичным, однако при переходе от прототипа к реальному устройству потребуется оптимизация алгоритмов обработки ввиду значительной ресурсоемкости преобразования уже на этапе создания прототипа.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Bosch Smart Home: Security and comfort from an single source [Electronic resource]. – Mode of access: <https://www.bosch-smarthome.com/uk/en/>. – Date of access: 05.05.2022.

2. Ubisys Sicherheits-Starterpaket Smart Home [Electronic resource]. – Mode of access: <https://www.smarthome-store.de/de/starter-kit/sicheheitsstarerpaket.html>. – Date of access: 22.09.2022.

3. Raspberry Pi Documentation [Electronic resource]. – Mode of access: <https://www.raspberrypi.com/documentation/>. – Date of access: 25.09.2022.

**НАДЁЖНОСТЬ, ДИАГНОСТИКА
И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ
КОНСТРУКЦИЙ МАШИН**

ДИАГНОСТИКА ЗОНЫ КОНТАКТА ПОВЕРХНОСТЕЙ ТРЕНИЯ МЕТОДАМИ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ТОМОГРАФИИ

Акулич Я. А.

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

При сближении двух поверхностей трения, их неровности, имеющие максимальную высоту, вступают в контакт. При увеличении нагрузки новые неровности меньшей высоты будут вступать в контакт, образуя при этом отдельные пятна контакта, общая площадь которых составляет фактическую площадь контакта поверхностей (ФПК).

Методы аналитического расчета ФПК, основанные на геометрических характеристиках поверхностей и по большей части рассчитанные для условий статического контакта, могут давать в достаточной степени приближенные оценки. Вместе с тем существует достаточное количество экспериментальных методов для определения ФПК поверхностей трения. По классификации, представленной в [1], данные методы можно условно разделить на три основные группы:

– методы, основанные на передаче и переносе энергии, дают возможность определять ФПК, например: по электропроводности, теплопроводности, нарушению полного внутреннего отражения, прохождению и отражению ультразвуковых волн;

– методы, использующие массоперенос, с помощью которых определяют ФПК, например: по переносу радиоактивных изотопов, микросмещению и переносу угольной пыли, переносу люминесцентных красок;

– метод, основанный на измерении деформаций определяет ФПК по сближению поверхностей.

Среди приведенных методов определения ФПК можно отметить ультразвуковой метод, с помощью которого возможность исследовать твердые сопрягающиеся движущиеся тела.

В основе ультразвукового метода лежит распространение волн ультразвука в твердых телах. ФПК определяется по величине коэффициента отражения волны от границы раздела сопрягаемых тел. Он рассчитывается как отношение энергии отраженной к энергии падающей волны.

Данный метод позволяет измерять ФПК оптически непрозрачных тел, находящихся в динамическом контакте. Вместе с тем согласно [2], можно выделить и недостатки данного метода. Главный из них – это рассеяние ультразвуковых колебаний на неровностях поверхности. Важным также является зависимость результатов от нагрева при фрикционном контакте сопрягаемых тел и структурной перестройки их поверхностных слоев. Данные недостатки могут быть источником существенной ошибки измерений ФПК и требуют применения компенсационных схем либо введения поправочных коэффициентов.

Диагностика узлов трения проводилась с использованием специально разработанного ультразвукового диагностического комплекса, схема которого пред-

ставлена на рисунке 1. Он имеет гибкую модульную структуру, основу которой составляет ультразвуковой диагностический эхотомоскоп ЭТС-У-02, имеющий сканирующие ультразвуковые пьезокерамические преобразователи с механическим секторным сканированием. Принцип работы эхотомоскопа основан на использовании метода эхо-импульсной ультразвуковой локации исследуемого объекта. УДК включает в себя также персональный компьютер, лазерный принтер и оптический сканер.

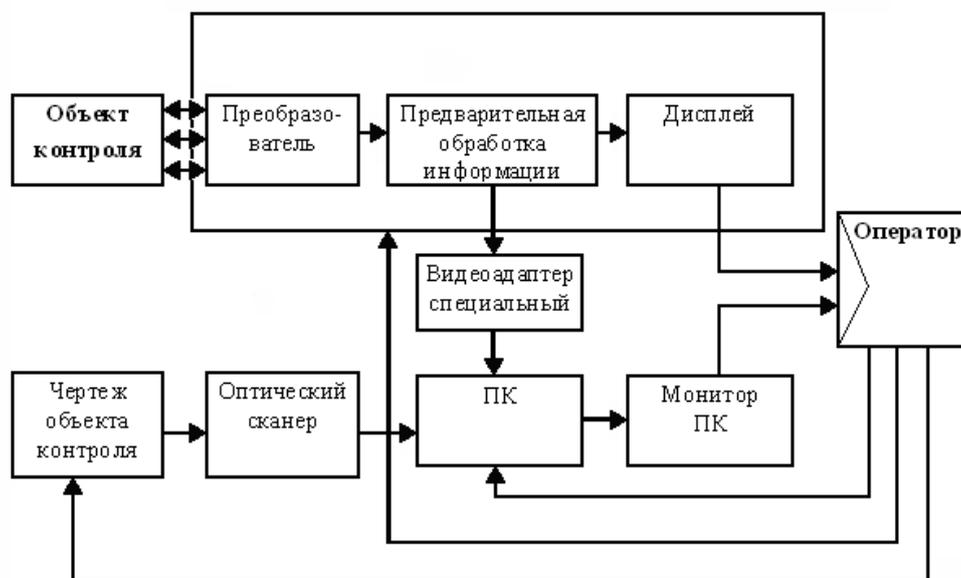


Рисунок 1 – Функциональная схема ультразвукового диагностического комплекса

При диагностике происходит механическое сканирование контролируемого объекта, помещенного в рабочую жидкость. Принятые эхосигналы подвергаются начальной обработке и отображаются на экране монитора эхотомоскопа в виде акустического изображения. Полученные изображения посредством специального видеоадаптера передаются для комплексной обработки в персональный компьютер.

Для диагностики процессов трения в составе ультразвукового диагностического комплекса используется машина трения 2070 СМТ-1 [3], рабочая камера которой была модернизирована для проведения ультразвуковой диагностики пар трения. Обеспечение контакта между испытываемой парой трения и ультразвуковым пьезокерамическим датчиком, установленном в специально разработанном приспособлении, осуществляется посредством рабочей жидкости, заполняющей рабочую камеру машины трения. В качестве смазочной среды при испытаниях было использовано масло И-40А, ГОСТ 20799-88.

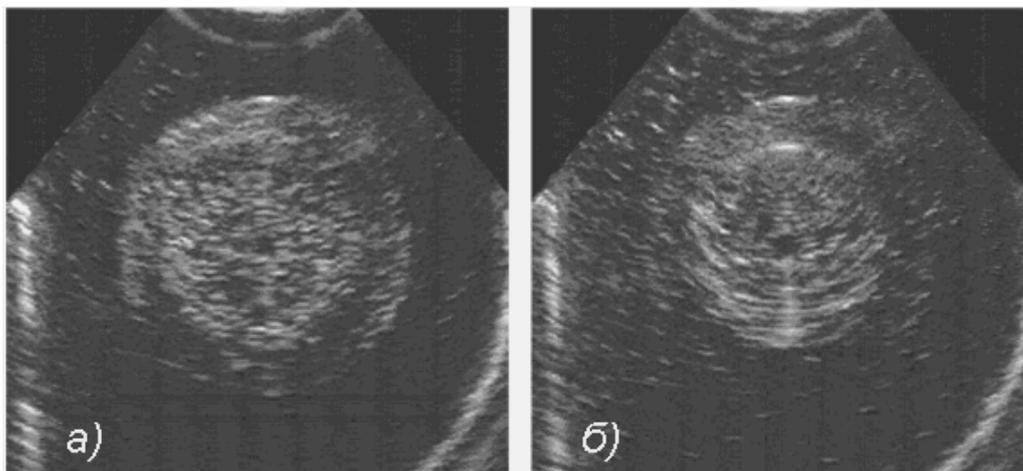
Испытания проводились по схеме “вал-втулка”. Образец, выступающий в качестве “вала” пары трения, был изготовлен из легированной конструкционной стали 40Х с последующей термообработкой до HRC 40...45, ГОСТ 4543-71, а втулки – из чугуна СЧ-25, ГОСТ 1412-85.

Размеры образцов составляли: наружный диаметр вала после механической обработки равнялся $\varnothing 35$ мм, внутренний соответствовал валу каретки машины

трения и составлял $\varnothing 22$ мм. Втулки были выполнены с наружным диаметром $\varnothing 50$ мм. Параметр шероховатости поверхностей трения образцов был задан $Ra = 1,25$.

В испытательной камере машины трения был установлен ультразвуковой датчик с механическим сканированием, имеющий рабочую частоту 3,5 МГц. Скорость скольжения составляла 1 м/с. Нагружение пары трения производилось последовательно путем пошагового увеличения нагрузки на 500 Н. Акустические изображения диагностируемой пары трения, полученные при помощи ультразвукового сканирования, представлены на рисунке 2.

Полученные акустические изображения пары трения типа “вал-втулка” дают возможность выявить критерии диагностирования узла трения посредством мониторинга областей контакта. Если в контактной области возникают локальные изменения, то существует в несколько раз большая по объему область, в которой существенно изменяется плотность вещества. Тем самым условия отражения сканирующих акустических импульсов изменяются, что влечет за собой и изменения в акустических изображениях. Так как полученные монохромные акустические изображения представляет собой матрицу точек, каждая из которых имеет ряд градаций яркости, то представляется возможным осуществить программный анализ наиболее характерных областей изображения. Каждой точке эхограммы соответствует определенная яркость, таким образом, существует возможность численного расчета яркости выделяемых на изображении областей, соответствующих контакту трущихся поверхностей изделия и определения ее зависимости от трибологических характеристик изделия.



а) скорость скольжения 1,0 м/с, без нагрузки;

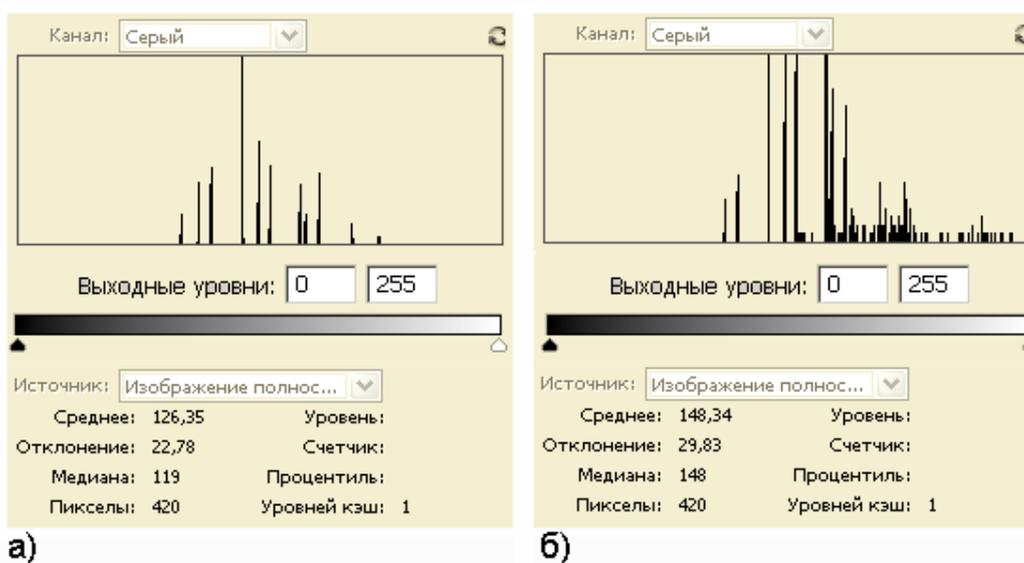
б) скорость скольжения 1,0 м/с, нагрузка 1000 Н

Рисунок 2 – Акустические изображения пары трения “вал-втулка”

Для определения зависимости характеристик яркости определенных характерных областей полученных акустических изображений от изменения условий нагружения пары трения в процессе экспериментальных исследований предлагается использовать гистограммы данных изображений.

Гистограмма изображения демонстрирует количество пикселей, обладающих теми или иными градациями яркости (то есть сосредоточенных на уровнях,

на которые равномерно разбит весь интервал от белого цвета до черного), на изображении в целом или в пределах выделенной области. Горизонтальная ось гистограммы представляет собой шкалу яркости пикселей от самых темных (яркость 0) слева до самых светлых (яркость 255) справа. На вертикальной оси гистограммы представлено количество пикселей, яркость которых соответствует градациям шкалы. Для построения гистограмм характерных областей полученных акустических изображений (рисунок 3) был использован программный пакет Adobe Photoshop от компании Adobe Systems Incorporated.



- а) скорость скольжения 1,0 м/с, без нагрузки;
 б) скорость скольжения 1,0 м/с, нагрузка 1000 Н

Рисунок 3 – Гистограммы выделенных областей акустических изображений пар “трения вал-втулка”, при условиях испытания

Как видно из полученных гистограмм, показатель усредненной яркости области акустического изображения, составляющий 420 пикселей, полученный при испытаниях нагруженной пары трения, составляет 148,34 в отличие от показателя 126,35 усредненной яркости при отсутствии нагружения.

Следует отметить, что на гистограмме участка изображения, соответствующей испытаниям пары трения без нагружения (рисунок 3а), значения диапазона яркости от 200 до 250 отсутствуют, тогда как при нагружении они имеют достаточно высокие показатели, что соответствует белому и близкому к белому цвету. Такие изменения характерных участков акустических изображений могут свидетельствовать о возможности выявления изменений в области контакта пар трения по их акустическим изображениям.

Таким образом, предлагается критерий количественной оценки триботехнических характеристик трущихся поверхностей, заключающийся в суммировании числа градаций яркости пикселей выделенной области акустического изображения и установлении корреляционной зависимости такой величины от акустических и трибологических параметров трущихся поверхностей.

Проведенные исследования позволяют говорить о возможности диагностики деталей узлов трения с помощью методов ультразвуковой томографии.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Мышкин Н. К. Трибология. Принципы и приложения / Н. К. Мышкин, М. И. Петроковец. – Гомель : ИМНС, НАНБ, 2002. – 310 с.
2. Богданович, П. Н. Трение и износ в машинах / П. Н. Богданович, В. Я. Прушак. – Минск: Высшая школа, 1999. – 374 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.

УДК 620.178.7

ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКОГО КОНТАКТА ТВЕРДЫХ ЧАСТИЦ С ДЕТАЛЯМИ МАШИН

*Барсуков В. Г., Илькевич М. А.¹, Крупич Б.²,
Голуб В. М.³, Веремейчик А. И.³, Хвисевич В. М.³*

- 1) *Гродненский государственный университет имени Янки Купалы,
г. Гродно, Республика Беларусь*
- 2) *Белостокский технологический университет,
г. Белосток, Польша*
- 3) *Брестский государственный технический университет;
г. Брест, Республика Беларусь*

Введение

Динамический контакт твердых частиц с деталями машин и оборудования широко распространен в технике и реализуется, как правило, в виде двух принципиально различающихся схем, первая из которых охватывает фрикционный скользящий контакт, а вторая – ударное взаимодействие. Типичными представителями машин, в которых реализуется фрикционный скользящий контакт, являются нагнетающие вентиляторы систем пневмотранспорта, оборудование для подачи измельченного топлива, ускорители центробежно-ударных измельчителей, классификаторы, сепараторы, испытательное оборудование и другие устройства для транспортирования дисперсных материалов, основным рабочим органом которого является ротор с лопастями. Вторая группа динамического взаимодействия представлена в системах дробеструйной и пескоструйной обработки, а также в измельчителях ударного действия.

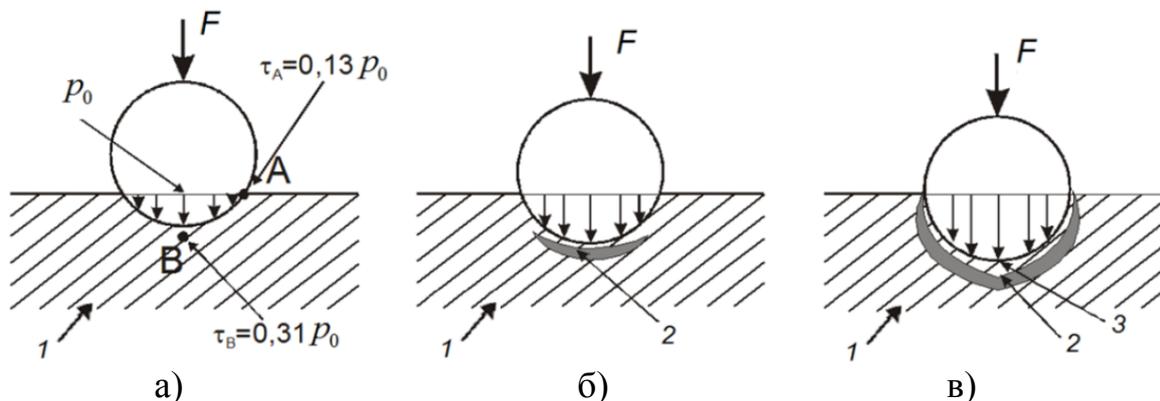
Несмотря на достигнутый прогресс в расчете и конструировании таких машин, многие вопросы изучены недостаточно. В частности, отсутствуют удобные для практики инженерные методики расчета параметров напряженного состояния, являющихся определяющими для анализа фрикционных потерь, а также изнашивания рабочих органов [1–3].

Цель работы – на основе анализа особенностей упруго-пластического динамического контакта выполнить сравнительный анализ методик математического моделирования и предложить удобную для практического использования методику расчетной оценки параметров такого контакта.

1 Механика процесса упруго-пластического деформирования

Рассмотрим механику процесса упруго-пластического деформирования при перпендикулярном контакте. Для анализа примем сферическую форму частиц.

Как было показано в работах [3, 4], процесс упруго-пластического контакта осуществляется в виде нескольких последовательно переходящих одна в другую стадий (рисунок 1).



*a – идеально упругая; б – стесненная упруго-пластическая;
в – свободная упруго-пластическая; 1 – упругая зона; 2 – пластическая зона;
3 – ядро (зона затрудненной деформации)*

Рисунок 1 – Стадии деформирования материала при контакте со сферической частицей

На начальной стадии (рисунок 1а) деформирование осуществляется упруго. Затем, при некоторой динамической нагрузке в приповерхностном слое ударяемого тела зарождается область пластического состояния, окруженная упруго-деформируемым материалом (рисунок 1б). При дальнейшем росте динамической нагрузки область пластического состояния выходит на поверхность деформируемой детали, после чего процесс характеризуется упруго-пластическим вдавливанием индентора (частицы) в деформируемую деталь. Наиболее подробно изучена первая стадия, которая подчиняется классическим решениям теории упругости [1, 2]. Промежуточная и заключительная стадии динамического упруго-пластического вдавливания изучены в меньшей мере. Применительно к заключительной стадии, но для схемы статического нагружения, М. Ю. Ишлинским был предложен подход, основанный на методах теории пластичности, согласно которому среднее давление в зоне контакта составляет [1, 2]

$$p_m = C\sigma_T, \quad (1)$$

где коэффициент C приблизительно равен 3 и зависит от формы индентора, а также трения на контактных поверхностях; σ_T – предел текучести материала. Однако такой подход не учитывает существование зоны упругой деформации под индентором и также является приближенным.

Имеется ряд исследовательских работ, посвященных численному анализу параметров напряженно-деформированного состояния, посвященных преимущественно квазистатическому индентированию материалов сферическим индентором. Предпринимаются также попытки аналитического решения соответствующей задачи. В частности, в работе [2] предложена упрощенная модель с шаровым ядром упруго-пластического внедрения (рисунок 2а). Согласно этой модели поверхность контакта охватывается полусферическим «ядром» радиуса r . Предполагается, что внутри ядра имеет место гидростатическое напряженное состояние интенсивностью, равной среднему контактному давлению p_m .

Анализ этой модели показал [1, 2], что для несжимаемого материала среднее давление определяется соотношением

$$\frac{p_m}{\sigma_T} \cong \frac{2}{3} \left(1,7 + \ln \frac{1}{3} \frac{rE_*}{R\sigma_T} \right). \quad (2)$$

Безразмерная переменная под знаком логарифма интерпретируется как отношение деформации, вызванной индентором (r/R) к упругой деформируемости материала (σ_T/E_*). На основе такого подхода построена зависимость (рисунок 2б) для зон упругого, стесненного упруго-пластического и свободного упруго-пластического деформирования. Из диаграммы видно, что заключительная стадия деформирования наступает при средних давлениях около $p_m \approx 2,7 \sigma_T$.

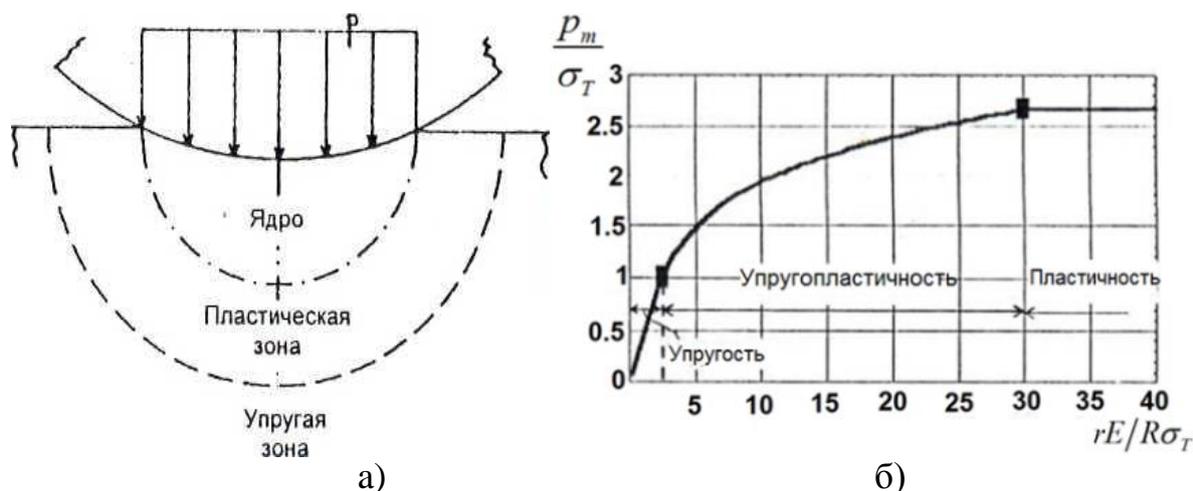


Рисунок 2 – Расчетная схема упруго-пластического деформирования с полусферическим «ядром» под индентором (а) и построенная на ее основе зависимость (б)

среднего контактного давления $\frac{p_m}{\sigma_T}$ от безразмерного радиуса контакта $\frac{rE_*}{R\sigma_T}$

2 Метод кусочно-линейных аппроксимаций

Вместе с тем, анализ показывает, что для технических расчетов возможна расчетная оценка параметров переходной зоны с использованием предположения о малости упруго-пластических деформаций и подчинении их закону Гука (метод кусочно-линейных аппроксимаций). Проанализируем напряженное состояние в зоне контакта с этих позиций.

На контуре пятна касания осевое напряжение равно нулю, а растягивающее радиальное σ_r и сжимающее тангенциальное σ_t равны между собой и могут быть определены по формуле [1, 2]

$$\sigma_r = -\sigma_t = \frac{1-2\nu}{3} p_0. \quad (3)$$

Условию начала свободного упруго-пластического вдавливания частицы соответствуют эквивалентные напряжения σ_{redA} в точке А (рисунок 1), равные пределу текучести σ_T детали лопасти. В соответствии с энергетической теорией Мизеса-Хубера Генки:

$$\sigma_{redA} = \sqrt{3} \cdot \frac{1-2\nu}{3} p_0 = \sigma_T, \quad (4)$$

где p_0 – наибольшие напряжения в зоне контакта (напряжения Герца).

При этом

$$p_0 = \frac{1}{\pi} \sqrt[3]{\frac{6F}{\eta^2 R^2}}, \quad (5)$$

где F – динамическое усилие; R – радиус частицы; η – универсальная упругая постоянная:

$$\eta = \frac{1}{E_*} = \frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2}, \quad (6)$$

где ν_1, ν_2, E_1, E_2 – коэффициенты Пуассона и модули упругости контактирующих тел соответственно; E_* – эффективный модуль упругости.

Из (4) следует, что

$$p_0 = \frac{\sqrt{3}\sigma_T}{1-2\nu}. \quad (7)$$

Среднее давление p_m в зоне контакта, в соответствии с теорией Герца, равно 2/3 от максимального [2]:

$$p_m = \frac{2}{3} p_0 = \frac{2\sqrt{3}}{3(1-2\nu)} \sigma_T. \quad (8)$$

Как видно из формулы (8), среднее давление в зоне контакта, соответствующее переходу от стесненного упруго-пластического деформирования (вторая стадия) к свободному пластическому индентированию (третья стадия), зависит от коэффициента Пуассона деформируемого материала.

Относительное среднее давление p_{rel} :

$$p_{rel} = \frac{p_0}{\sigma_T} = \frac{2\sqrt{3}}{3(1-2\nu)}. \quad (9)$$

Применительно к динамическому (ударному) нагружению, значение скорости соударения V_{mi} , соответствующее началу пластического индентирования, как показано в [4],

$$V_{mi} = 67,02 \sqrt{\frac{\sigma_T^5}{E^4 \gamma}}, \quad (10)$$

где γ – плотность материала сферической частицы.

3 Результаты математического моделирования и их обсуждение

В качестве модельных материалов для оценочных расчетов параметров упруго-пластического статического контакта принята сталь ($E = 200$ ГПа; $\gamma = 7800$ кг/м³; $\nu_l = 0,3$; эффективный модуль упругости при контакте стали со сталью $E_* = 109,89$ ГПа). В качестве материала контактирующих со сферической частицей детали приняты углеродистые конструкционные стали по ГОСТ 1050-2013. Оценку характеристических скоростей ударного взаимодействия применительно к газоабразивному изнашиванию производили на примере контактного взаимодействия кварцевого песка со сталью. Для кварца модуль упругости и коэффициент Пуассона равны соответственно: $E_k = 73$ ГПа; $\nu_k = 0,2$. Эффективный модуль упругости для контакта кварца со сталью составляет $E_* = 56,49$ ГПа.

В таблице 1 приведены рассчитанные по формуле (9) значения относительного среднего давления p_{rel} для широкого диапазона изменения коэффициента Пуассона деформируемого материала, характерного для конструкционных углеродистых сталей.

Таблица 1 – Расчетные значения относительного среднего давления p_{rel} для широкого диапазона изменения коэффициента Пуассона деформируемого материала

Коэффициент Пуассона ν	0,28	0,29	0,30	0,31	0,32
Среднее относительное давление начала пластического течения p_{rel}	2,62	2,75	2,89	3,04	3,21

Сравнение данных таблицы 1 с результатами К. Джонсона ($p_{rel} \approx 2,7$) и Ишлинского ($p_{rel} \approx 3$) показывает удовлетворительное согласование, что свидетельствует о возможности применения метода кусочно-линейных аппроксимаций для расчетной оценки силовых параметров начала пластического течения. Вместе с тем эти значения характеризуют только начальную стадию этого процесса, не учитывают последующее деформационное упрочнение материала, неравномерно распределенное в объеме очага деформации. В связи с изложенным, для области развитого пластического течения целесообразно использовать другие данные, например, полученные из опытов на определение твердости материалов по Бринеллю и Майеру (таблица 2).

Таблица 2 – Показатели механических свойств и значения скорости начала пластического индентирования V_{ni} и разрушения V_{np} наклепанной поверхности конструкционных углеродистых сталей по ГОСТ 1050-2013 кварцевым песком

Марка стали	Предел текучести σ_T , МПа	Твердость по Бринеллю, HB , МПа	Твердость по Майеру, HM , МПа	HB/σ_T	V_{ni} , м/с	V_{np} , м/с
20	245	1599	1626	6,53	0,25	13,10
25	275	1672	1771	6,08	0,33	15,77
30	295	1751	1850	5,94	0,40	18,96
35	315	2031	1936	6,45	0,47	22,90
40	335	2131	2229	6,36	0,55	27,11
45	355	2246	2338	6,33	0,63	29,11
50	375	2366	2464	6,31	0,72	31,57
55	380	2498	2595	6,57	0,75	33,86
60	400	2498	2595	6,25	0,85	37,05

Математическая обработка полученных данных показала, что среднее значение отношения твердости по Бринеллю (МПа) к пределу текучести составляет $HB (\text{МПа})/\sigma_T = 6,33$, а среднее значение отношения твердости по Майеру (МПа) к пределу текучести составляет $HM (\text{МПа})/\sigma_T = 6,53$, что существенно выше характеристических расчетных значений начала пластического индентирования, приведенных в таблице 1.

Деформационное упрочнение многократно увеличивает также и критические значения скоростей соударения, необходимых для начала разрушения по-

верхности. В частности, результаты моделирования и расчетов, приведенные в работе [4] показывают, что предельная скорость контактной прочности, приводящая к интенсивному газо-абразивному изнашиванию, почти на два порядка превышает скорость, характерную для начала упруго-пластического деформирования поверхностного слоя.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Свириденко, А. И. Механика дискретного фрикционного контакта / А. И. Свириденко, С. А. Чижик, М. И. Петроковец. – Минск, Наука и техника, 1990. – 272 с.
2. Джонсон, К. Механика контактного взаимодействия / К. Джонсон. – М. : Мир, 1989. – 570 с.
3. Крупич, Б. Моделирование микроконтактных взаимодействий при скольжении твердых частиц вдоль радиальных лопастей турбомашин / Б. Крупич, В. Г. Барсуков, М. А. Илькевич // Трение и износ. – 2022. – Т. 43, № 2. – С. 141–149.
4. Крупич, Б. Моделирование микроконтактных взаимодействий при газоабразивном изнашивании сталей с учетом деформационного упрочнения / Б. Крупич, В. Г. Барсуков, А. И. Свириденко // Трение и износ. – 2019. – Т. 40, № 6. – С. 644–653.

УДК 620.98

ИССЛЕДОВАНИЯ ПНЕВМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ВАГОНА-ЛАБОРАТОРИИ

Борисова Ю. А., Иголкин А. А.

*Самарский национальный исследовательский университет
имени академика С. П. Королева, г. Самара, Российская Федерация*

В ходе работы была рассмотрена проблема энергосбережения и ее актуальность в настоящее время, были изучены методы сбережения сжатого воздуха и проведен литературный обзор, подобрано оборудование для системы, произведена модернизация системы, разработана модель поведения системы в программной среде AMESIM, проведен эксперимент и выполнен анализ результатов.

Сжатый воздух сегодня широко используется в промышленности. Несмотря на то, что она может работать адекватно, стоит более внимательно изучить систему для повышения операционной эффективности, поскольку потенциальная экономия может составить тысячи долларов эксплуатационных расходов и привести к значительному сокращению выбросов парниковых газов каждый год [1].

В программной среде AMESIM были созданы имитационные модели реальных пневматических систем, используемых на вагонах лабораториях. Проведение математических моделирований подразумевает дальнейшее использование предложенных способов для реальных систем в случае положительного результата.

В процессе исследования пневматической системы вагона были предложены методы по сбережению энергии сжатого воздуха, такие как уменьшение диамет-

ров пневмоцилиндров (рисунок 1), снижение давления в системе (рисунок 2) и замена цилиндров двустороннего действия на цилиндры одностороннего действия (рисунок 3).

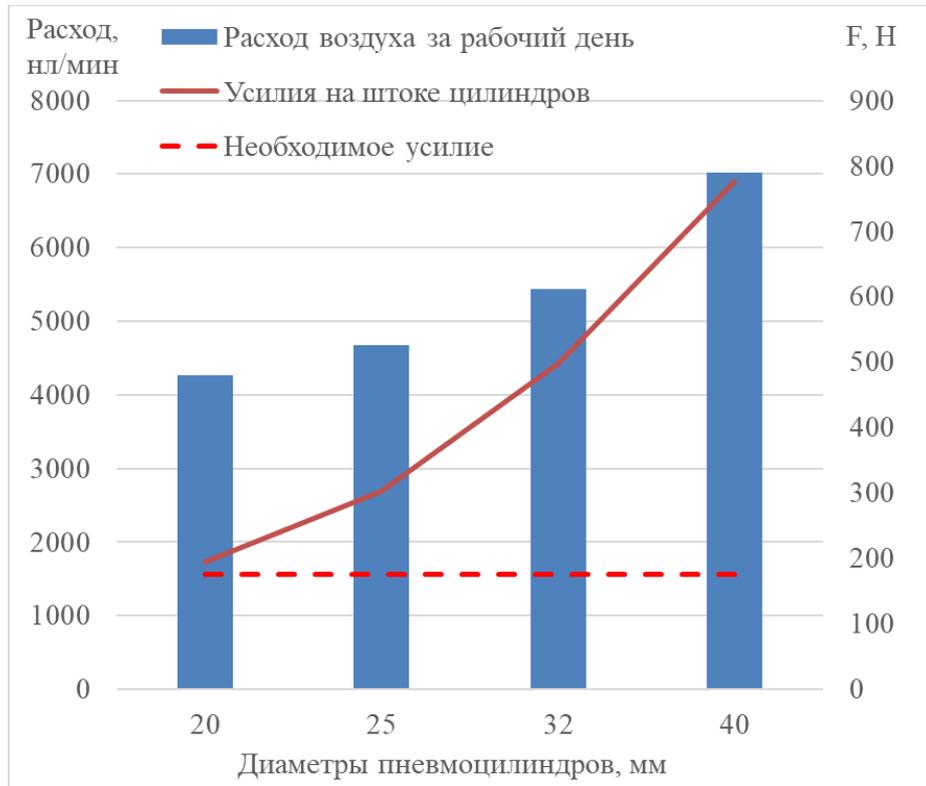


Рисунок 1 – График расхода воздуха при различных диаметрах цилиндров

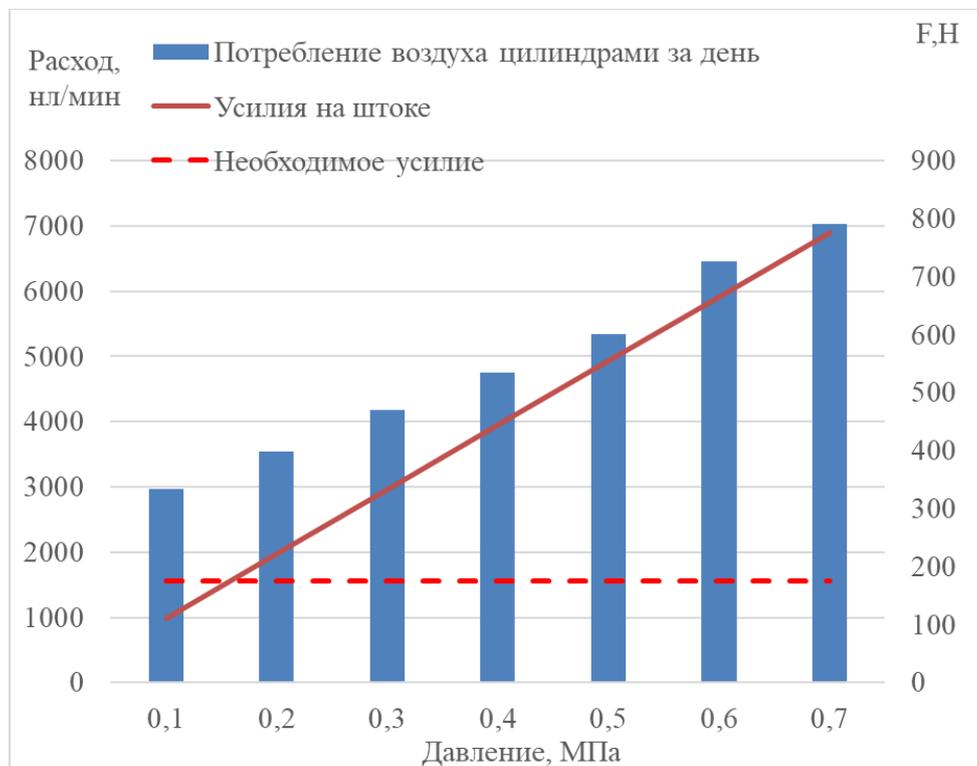


Рисунок 2 – График расхода воздуха при различных давлениях в системе



Рисунок 3 – График потребления воздуха для цилиндров двустороннего и одностороннего действия

Для подтверждения теоретических расчетов имитационной модели был проведен эксперимент, который доказывает эффективность замены пневмоцилиндра двустороннего действия на пневмоцилиндр с пневматической пружиной (рисунок 4) [2].

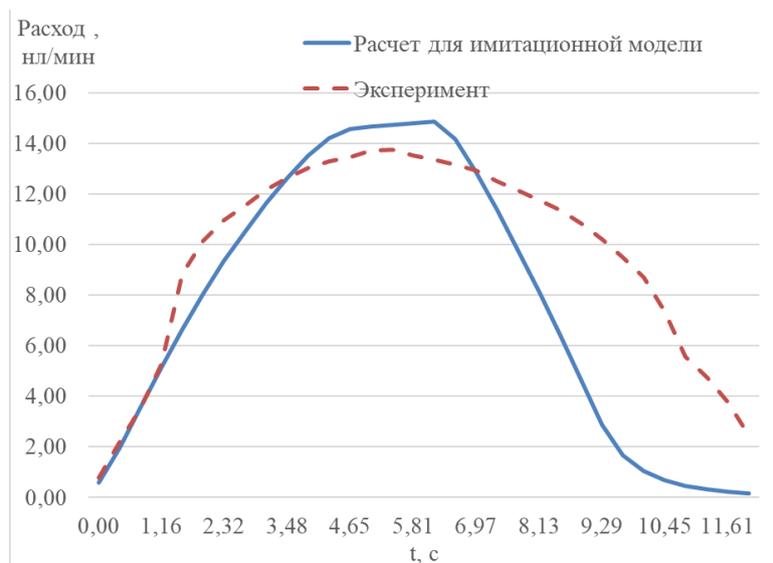


Рисунок 4 – График потребления воздуха системой с цилиндром двустороннего действия при давлении в системе 0,5 Мпа

Так, предложенный метод с пневматической пружиной за год сохранит производству 118750 рублей [2].

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Осипов, В. А. Энергосберегающие пневматические приводы технологических машин: автореферат / В. А. Осипов [Электронный ресурс]. – URL: Режим доступа: <https://www.dissercat.com/content/energoberegayushchie-pnevmaticheskie-privody-tehnologicheskikh-mashin>.
2. Потребление воздуха в пневмосистеме // Учебник Camozzi. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://did.camozzi.ru/#!/d01g01s01p87>.

УДК 921.9.06

НАЗНАЧЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО РЕСУРСА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Горбунов В. П.¹, Тюшкевич В. В.²

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, с обеспечением заданной производительности и требуемого качества выпускаемой продукции. Сохранение безотказности работы оборудования является важной задачей при его эксплуатации и обеспечивается системой технического обслуживания и ремонта. Незапланированные простои, связанные с низким уровнем технического обслуживания приводят к серьезным экономическим потерям. Чтобы избежать этого ставится задача обеспечения научно-обоснованного значения технического ресурса с учетом факторов надежности для выбора конструктивных и технологических решений, обеспечивающих показатели долговечности. Эта проблема решается комплексом мер, применяемых на всех стадиях жизнедеятельности оборудования [1].

В этой связи актуальным становится прогнозирование ресурса на стадии проектирования для назначения обоснованного графика технического обслуживания, времени межремонтного периода, а также сроков службы узлов и деталей [2].

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

В качестве объекта исследования рассмотрен привод шприца вакуумного, двухвинтового для наполнения колбасных оболочек фаршем. Характерным элементом, который лимитирует время технического обслуживания, являются установленные в опорные решетки опорные втулки винтов вытеснителя, которые выполняют функцию подшипников скольжения и изготавливаются из композиционного материала на основе фторопласта [3]. В процессе работы втулки подвергаются сильному износу. Основными причинами износа является биение шнеков, вызванное погрешностями изготовления и сборки элементов привода, работой на разных по плотности и температуре пищевых материалах, частой разборкой при санитарной обработке, а также их работа в кислотно-щелочной среде.

Внутренний диаметр опорной поверхности втулок выполняется с размером $20^{+0,04}$ мм. Допустимый размер изношенной поверхности составляет, согласно техническим условиям изготовителя, $\varnothing 20,2$ мм.

Эксплуатация оборудования проводилась при двухсменной работе с использованием переключки на больших оборотах (т. е. оборудования максимально загружено по техническим параметрам и возможностям). Средняя скорость составляла 70–75 % ($460\text{--}490 \text{ мин}^{-1}$) от максимальной. Наблюдения за износом втулок проводились каждую неделю при плановом осмотре и обслуживании оборудования. При достижении времени обслуживания втулки заменялись на новые, с фиксацией фактической величины износа. Изъятые втулки были проверены и обмеряны на контрольно-измерительной машине. Проведенные наблюдения показали, что наиболее изнашиваемой является левая втулка узла, изменяющиеся параметры которой в дальнейшем будут рассматриваться. Испытания проводились до и после проведения текущего ремонта, при котором была произведена замена шнеков, втулок на валах раздаточной коробки, замена подшипников и расходных материалов. Полученная выборка представлена на рисунке 1, что позволило более подробно и точно выявить срок службы втулок и вести статистику износа.

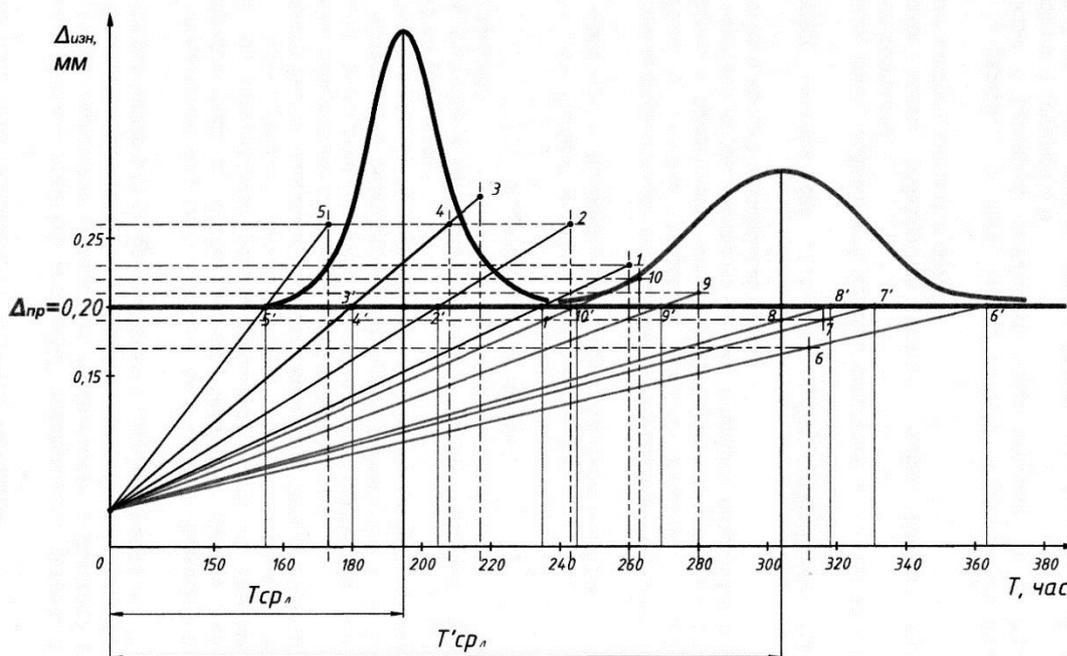


Рисунок 1 – Распределение времени наработки до предельного состояния левой втулки до и после текущего ремонта

В работе [4] представлены значения наработки до предельного состояния (ресурса) левых и правых опорных втулок, определены скорости их изнашивания. Расчеты показали, что средняя скорость изнашивания каждой из выборок втулок практически одинаковая: $0,0012$ мм/час для правой втулки, $0,0013$ мм/час для левой (до текущего ремонта) и соответственно $0,00066$ мм/час для правой втулки и $0,00067$ мм/час для левой втулки (после текущего ремонта) скорость изнашивания уменьшилась почти в два раза.

На рисунке 1 представлены графики распределений сроков службы, приведенные к предельному состоянию левой втулки. Значения в точках 1...10 показывают величины износа по фактической наработке до замены втулок, точки 1'... 10' – приведенные значения времени наработки величины предельного износа $\Delta_{np} = 0,2$ мм. Правый график характеризует состояние втулок после текущего ремонта, левый график до текущего ремонта.

Из графика видно, что с каждым разом при замене комплекта втулок срок их службы до предельного износа уменьшался. При измерении изношенных втулок на контрольно-измерительной машине было обнаружено у 90 % втулок отклонение от цилиндричности опорной поверхности на величину 0,2–0,3 мм, что говорит о присутствии в данном узле биения шнеков. Следствием данного износа стала потеря давления при вытеснении фарша (фарш возвращался обратно в зону вытеснения из-за увеличения люфтов, в результате выработки корпуса вытеснителя и шнеков). Данная выработка начала влиять на скорость выхода продукта, вследствие чего упала производительность и качество продукции, вследствие чего данный узел пришлось ремонтировать.

После проведения текущего ремонта средний срок службы данных втулок увеличился с 195 часов до 304 часа.

Проведенные исследования ресурса опорных втулок в условиях эксплуатации позволили произвести оценку условий работы данных деталей; определить основные критерии, влияющие на нарушение работоспособного состояния узла, получить статистические данные по параметрам износа втулок и срокам службы узла. Все это дает возможность использовать полученные статистические данные для моделирования на этапе проектирования технического состояния оборудования с целью прогнозирования ресурса [5]. Также данные можно использовать для проведения компьютерного моделирования влияния условий эксплуатации на изделие в среде САПР и прогнозирования технического ресурса узла.

Наблюдения, которые были проведены при обслуживании шприца, показывают, что увеличение величины износа выше допустимого, от 0,2 мм до 0,25 мм, незначительно влияет на работоспособность оборудования. Так после текущего ремонта при принятой схеме обслуживания (замена втулок через 220 часов работы) ресурс втулок не вырабатывался (см. рисунок 1, точки 6,7,8,9). Практические наблюдения показывают (см. рисунок 1, точка 3), что данный узел может работать при предельно допустимом значении износа и равной 0,3 мм при критических условиях эксплуатации, однако срок службы данного узла уменьшится из-за увеличения скорости изнашивания лимитирующего элемента, которая увеличивается за счет возникающих дополнительных нагрузок на элементы сопрягаемых деталей узла. Поэтому для обеспечения оптимального времени работы оборудования произведено прогнозирование увеличения ресурса при повышении области допустимого значения износа. При увеличении предельного допустимого значения износа до 0,25 мм среднее значение срока службы втулок увеличивается. На рисунке 2 приведены графики зависимости величины износа от времени для левой втулок при увеличении Δ_{np} до 0,25 мм. По результатам прогнозирования определены средние значения сроков службы втулок $T_{ср}$ при предельно допустимых значениях износа $\Delta_{np} = 0,20$ мм и $\Delta'_{np} = 0,25$ мм. Полученные данные представлены в таблице 1.

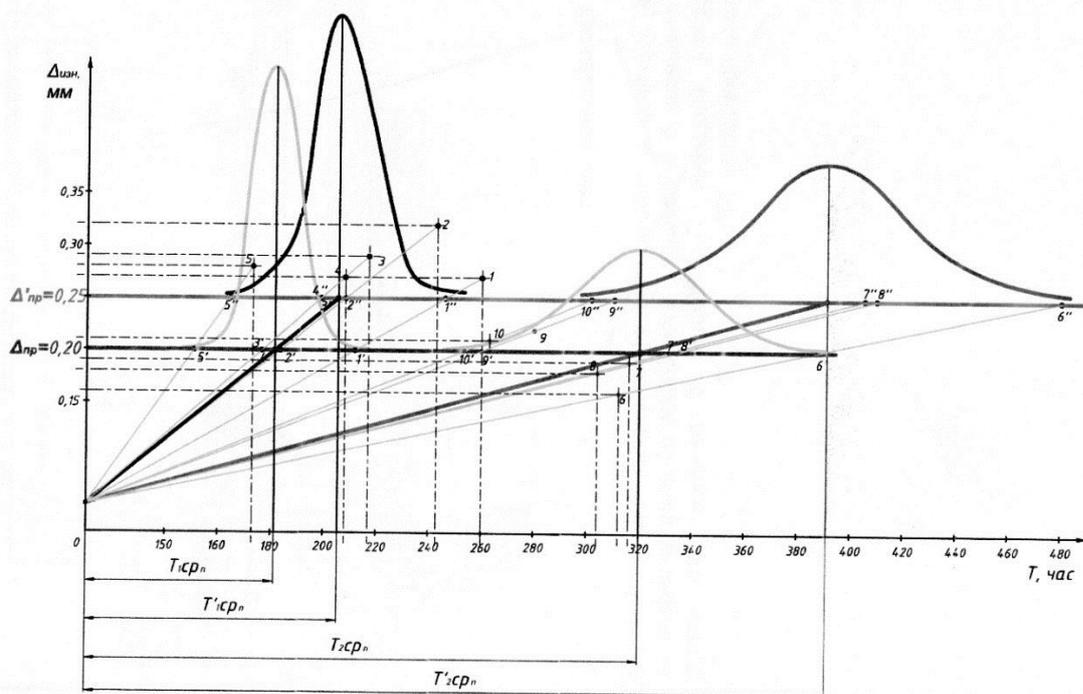


Рисунок 2 – Распределение времени наработки до предельного состояния левой втулки до и после текущего ремонта при $\Delta_{пр} = 0,25$ мм

Таблица 1 – Значение среднего срока службы $T_{ср}$ при разных значениях

Втулка	Средний срок службы втулки $T_{ср}$, час, при		Средний срок службы втулки $T_{ср}$, час, при	
	До текущего ремонта	После текущего ремонта	До текущего ремонта	После текущего ремонта
Левая	195	304	223	370
Правая	191	320	205	391

Выводы

Проведенные исследования показали, что при существующей системе обслуживания технический ресурс втулок используется не полностью. Это приводит к увеличению издержек на предупредительную замену деталей. Приведенные расчеты показали возможность сокращения количества и объема работ при техническом обслуживании шприца по замене втулок в межремонтном периоде, что в итоге позволяет уменьшить организационные и экономические затраты.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Проников, А. С. Параметрическая надежность машин / А. С. Проников. – М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002. – 560 с.
2. Болотин, В. В. Прогнозирование ресурса машин и конструкций / В. В. Болотин. – М. : Машиностроение, 1984. – 312 с.
3. Ивашов, В. И. Технологическое оборудование предприятий мясной промышленности: учеб. пособие: в 2 ч. / В. И. Ивашов – СПб : ГИОРД, 2003. – Ч. 2–464 с.

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

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

УДК 539.3

О ДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ТОНКОСТЕННЫХ ПОДКРЕПЛЕННЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ, ПОДВЕРЖЕННЫХ ВНЕШНЕМУ ДАВЛЕНИЮ

Игнатюк В. И.

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

Тонкостенные цилиндрические элементы, являющиеся по своей работе оболочками, находят широкое применение в элементах машиностроительных конструкций и станков. Учитывая высокую прочность оболочечных элементов, их несущую способность при действии внешнего давления определяет чаще всего способность сохранять исходную форму, то есть их устойчивость. Более высокая устойчивость будет у оболочек, подкрепленных ребрами жесткости. Статическая устойчивость таких оболочек обсуждалась в работе [1]. Такие элементы в машиностроении могут подвергаться и импульсным нагрузкам. Здесь рассматривается нагрузка, быстро возрастающая во времени (треугольный импульс). И в этом случае говорят о динамической устойчивости элементов.

Подкрепленный цилиндрический элемент рассматривается как ребристая круговая тонкостенная цилиндрическая оболочка, которая представляет собой систему, состоящую из тонкой обшивки и жестко с ней соединенных по линиям контакта продольных (стрингеры) и поперечных (шпангоуты) ребер (рисунок 1).

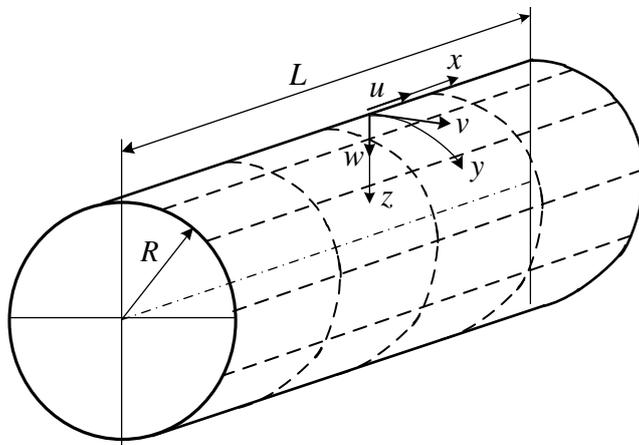


Рисунок 1 – Расчетная схема подкрепленного цилиндрического оболочечного элемента

Элемент нагружается импульсом быстро возрастающего внешнего давления $q = \gamma t$, где γ – скорость возрастания импульса.

Для расчета обшивки используется линейная теория тонких упругих оболочек [1], а для расчета ребер – теория криволинейных стержней. При этом гипотеза прямолинейного недеформируемого элемента принимается справедливой как для обшивки, так и в целом для системы «обшивка-ребро» (в местах наличия ребер). Учитываются дискретность расположения ребер и их несимметричность относительно обшивки.

Уравнение движения системы

При динамическом нагружении для решения задачи необходимо рассмотреть 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 $\Lambda = K - U$ – функция Лагранжа; U – полная потенциальная энергии системы, выражение которой через перемещения срединной поверхности оболочки u , v и w (рисунок 1) представлено в работе [2]; K – кинетическая энергия элемента; q_s , \dot{q}_s – обобщенные координаты и скорости по направлениям деформирования элемента u , v и w .

Кинетическая энергия элемента, состоящего из обшивки и ребер, при учете только сил инерции, действующих в радиальных направлениях, и с учетом равенства радиальных перемещений обшивки и ребер, имеет вид

$$K = \frac{\rho_o h}{2} \int_0^L \int_0^{2\pi R} \left(\frac{\partial w}{\partial t} \right)^2 dx dy + \frac{\rho_c A_c}{2} \sum_{i=1}^k \int_0^L \left(\frac{\partial w}{\partial t} \right)^2 \Big|_{y=y_i} dx + \frac{\rho_u A_u}{2} \sum_{j=1}^{k_1} \int_0^{2\pi R} \left(\frac{\partial w}{\partial t} \right)^2 \Big|_{x=x_j} dy, \quad (2)$$

где k , k_1 – число стрингеров и шпангоутов; A_c , A_u и ρ_c , ρ_u – площади поперечных сечений и плотности материалов стрингеров и шпангоутов.

Учитывая, что полная потенциальная энергии не зависит от скоростей, а кинетическая энергия (2) от координат, уравнение Лагранжа второго рода (1) может быть записано в виде

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial K}{\partial \dot{q}_s} \right) - \frac{\partial U}{\partial q_s} = 0. \quad (3)$$

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

$$\begin{aligned} u &= \cos \frac{\pi mx}{L} \left[a_1 \cos \frac{ny}{R} + a_2 \sin \frac{ny}{R} \right]; \\ v &= \sin \frac{\pi mx}{L} \left[b_1 \sin \frac{ny}{R} + b_2 \cos \frac{ny}{R} \right]; \\ w &= \sin \frac{\pi mx}{L} \left[c_1 \cos \frac{ny}{R} + c_2 \sin \frac{ny}{R} \right], \end{aligned} \quad (4)$$

где m – число полуволн вдоль образующей обшивки (вдоль оси x); n – число полуволн вдоль окружности обшивки; a_i, b_i, c_i – неизвестные параметры перемещений, соответствующие симметричному и кососимметричному деформированию.

Взяв производные от кинетической и полной потенциальной энергий согласно уравнению Лагранжа второго рода (3) с учетом аппроксимации (4), получим две независимые системы уравнений относительно постоянных аппроксимации a_1, b_1, c_1 , и a_2, b_2, c_2 вида:

$$\left\{ \begin{array}{l} A_{11}a_1 + A_{12}b_1 + A_{13}c_1 = 0; \\ A_{21}a_1 + A_{22}b_1 + A_{23}c_1 = 0; \\ A_{30} \frac{d^2c_1}{dt^2} + A_{31}a_1 + A_{32}b_1 + A_{33}c_1 = 0; \end{array} \right. \left\{ \begin{array}{l} B_{11}a_2 + B_{12}b_2 + B_{13}c_2 = 0; \\ B_{21}a_2 + B_{22}b_2 + B_{23}c_2 = 0; \\ B_{30} \frac{d^2c_2}{dt^2} + B_{31}a_2 + B_{32}b_2 + B_{33}c_2 = 0. \end{array} \right. \quad (5)$$

Первая из них описывает симметричное, а вторая кососимметричное деформирование подкрепленной оболочки. Ввиду полной идентичности обеих систем уравнений и получения одной из другой путем замены B на A либо A на B , дальнейшие преобразования будем выполнять для одного типа деформирования, например, симметричного.

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

$$\frac{d^2c_i}{dt^2} + \omega_{mn}^2 \left(1 - \frac{\sigma_y}{\sigma_{mny}} \right) c_i = 0, \quad (6)$$

где ω_{mn}^2 – частота свободных колебаний, отвечающая рассматриваемой форме деформирования оболочки; σ_{mny} – соответствующие этой форме деформации статические критические напряжения внешнего давления.

Учитывая зависимость между напряжениями и внешним давлением,

$$\sigma_y = k_{Auu} q \frac{R}{h}, \quad \text{где } k_{Auu} = \frac{1}{1 + \frac{A_{uu}}{hl_{uu}}}, \quad (7)$$

уравнение движения оболочки может быть приведено к виду

$$\frac{d^2c_i}{dt^2} + \omega_{mn}^2 \left(1 - \frac{\gamma t}{q_{mn}} \right) c_i = 0. \quad (8)$$

Здесь h – толщина обшивки; l_{uu} – шаг шпангоутов; q_{mn} – величина критической нагрузки, отвечающая рассматриваемой форме деформирования (волно-образования) оболочки.

Решение задачи динамической устойчивости

Для решения задачи устойчивости при динамическом нагружении необходимо определить время действия и соответствующее значение нагрузки, при

которых становится возможным интенсивное развитие прогибов или интенсивное возрастание скорости деформирования (выпучивания). Для определения этих параметров используем критерий, предложенный И. Я. Амиро [1] и позволяющий получить аналитические выражения этих величин.

Введем обозначение $t = \bar{\tau} + \frac{q_{mn}}{\gamma}$, где $\frac{q_{mn}}{\gamma}$ – время, необходимое для достижения статического критического давления для рассматриваемой формы деформирования. Тогда уравнение (8) можно преобразовать к виду

$$\frac{d^2 c_i}{d \bar{\tau}^2} - d_{mn} \bar{\tau} c_i = 0, \quad (9)$$

где $d_{mn} = \frac{\omega_{mn}^2 q_3}{q_{mn}}$; $\bar{\tau} = \frac{\gamma \tau}{q_3}$ – безразмерный параметр времени, прошедшего

после достижения величиной q значения статического критического давления q_{mn} ; q_3 – минимальное значение (эйлерово) критической нагрузки для элемента.

Решение уравнения (9) можно получить [1] в виде степенных рядов по степеням куба $\bar{\tau} \sqrt[3]{d_{mn}}$. А поскольку куб этой величины начинает сильно возрастать после того, когда она достигнет значения, равного единице, то за критерий динамической потери устойчивости, определяющей начало интенсивного развития прогибов, принимается условие:

$$\bar{\tau} \sqrt[3]{d_{mn}} = 1. \quad (10)$$

Применяя этот критерий динамической потери устойчивости, получим критическое время для рассматриваемой формы изгиба

$$t_{kr\ mn} = \frac{q_3}{\gamma \sqrt[3]{d_{mn}}} + \frac{q_{mn}}{\gamma}, \quad (11)$$

величину динамической критической нагрузки

$$q_{\partial mn} = t_{kr\ mn} \gamma = \frac{q_3}{\sqrt[3]{d_{mn}}} + q_{mn}, \quad (12)$$

и соответствующую величину коэффициента динамичности, представляющего собой отношение динамической критической нагрузки для данной формы изгиба к эйлеровой статической критической нагрузке для рассматриваемого оболочечного элемента

$$k_{\partial mn} = \frac{q_{\partial mn}}{q_3} = \frac{1}{\sqrt[3]{d_{mn}}} + \frac{q_{mn}}{q_3}. \quad (13)$$

С учетом введенных ранее обозначений выражение (13) может быть записано в виде

$$k_{\partial mn} = \frac{1}{q_3} \sqrt[3]{\frac{q_{mn} \gamma^2}{\omega_{mn}^2}} + \frac{q_{mn}}{q_3}. \quad (14)$$

Динамическая критическая нагрузка $q_{kr\ mn}$ и отвечающая ей величина коэффициента динамичности k_{∂} , соответствующие потере устойчивости

оболочечного элемента при импульсном нагружении, определяется путем минимизации выражений (12) – (14) по параметрам волнообразования m и n :

$$q_{\delta kr} = \min(q_{\delta mn}); \quad k_{\delta} = \min(k_{\delta mn}). \quad (15)$$

Результаты расчетов. На основе полученных зависимостей выполним расчет изотропного цилиндрического элемента радиусом $R = 120$ мм, длиной $L = 300$ мм и толщиной оболочки $h = 0,3$ мм ($R / h = 400$), изготовленного из материала АМГ ($R = 6,67 \cdot 10^4$ МПа, $\rho_o = 0,26 \cdot 10^3$ кг/м³) и нагруженного быстро возрастающим по линейному закону внешним давлением со скоростью γ от $3 \cdot 10^3$ до $1 \cdot 10^6$ кПа/с. Для подкрепления приняты уголки $\perp 5,0 \times 2,5 \times 0,3$ с присоединением к оболочке большей полкой с внешней стороны.

Результаты вычисления динамических критических нагрузок (коэффициентов динамичности) и соответствующих им параметров волнообразования в зависимости от скорости нагружения для неподкрепленной (гладкой) и подкрепленной шестью ($k_1 = 6$) шпангоутами, которые располагаются таким образом, что расстояние между ними в два раза больше, чем расстояние от крайних шпангоутов до краев оболочки, приведены в таблице.

Таблица – Коэффициенты динамичности и параметры волнообразования оболочек в зависимости от скорости нагружения

γ , кПа/с	$3 \cdot 10^3$	$1 \cdot 10^4$	$3 \cdot 10^4$	$1 \cdot 10^5$	$3 \cdot 10^5$	$1 \cdot 10^6$
Гладкая оболочка ($Q_o = 8,08$ кПа, $n = 8$, $m = 1$)						
k_{δ}	1,292	1,652	2,357	3,903	6,596	11,977
n	8	8	8	10	12	16
m	1	1	1	1	1	1
Элемент, подкрепленный шпангоутами ($Q_o = 64,10$ кПа, $n = 5$, $m = 1$)						
k_{δ}	1,053	1,118	1,246	1,486	1,721	2,271
n	5	5	5	20	20	21
m	1	1	1	7	7	7

На основе результатов вычислений можно сделать следующие выводы. Величины динамических критических нагрузок (коэффициентов динамичности) растут с возрастанием скорости нагружения. При этом изменяются также формы волнообразования оболочечных элементов. Для подкрепленных оболочек возможно скачкообразное возрастание числа волн, соответствующее переходу к качественно новым случаям деформации. Так, для рассмотренных подкрепленных шпангоутами элементов при достижении скоростью возрастания внешнего давления величины $\gamma = 1 \cdot 10^5$ кПа/с деформирование изменилось от общего случая с $n = 5$, $m = 1$, когда шпангоуты и изгибаются, и закручивается, к случаю деформации с $n = 20$, $m = 7$, когда шпангоуты только закручивается.

Изложенное свидетельствует о том, что с ростом скоростей нагружения влияние дискретности ребер возрастает.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Амиро, И. Я. Методы расчета оболочек : в 5-ти т. / И. Я. Амиро, В. А. Заруцкий. – К. : Наук. думка, 1980. – Т. 2 : Теория ребристых оболочек. – 368 с.

2. Игнатюк, В. И. К определению рациональных параметров подкрепления тонкостенных цилиндрических элементов, подверженных внешнему давлению / В. И. Игнатюк // Новые технологии и материалы, автоматизация производства : сб. ст. Межд. науч.-техн. конф., посв. 55-летию Брест. гос. техн. ун-та / Брест. гос. техн. ун-т. – Брест : Изд-во БрГТУ, 2021. – С. 111–116.

УДК 621. 81: 621 – 192

РАЗРАБОТКА МЕРОПРИЯТИЙ ПО ОПТИМИЗАЦИИ МАССОГАБАРИТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК И НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ МАЧТЫ

Капуста П. П.¹, Мойсейчик А. Н.¹, Шейбут Г. Е.²

1) Белорусский национальный технический университет;

г. Минск, Республика Беларусь

2) ООО «СЕЙСМОТЕХНИКА»; г. Солигорск, Республика Беларусь

Рассматриваемая мачта является не стационарной, а передвижной конструкцией, поэтому при использовании большое значение имеет ее масса (рисунок 1а, рисунок 1б). Для оптимизации исследуемой конструкции (вышки) несущим элементом был выбран равнополочный прокатный уголок 140x140x10 вместо трубы прямоугольного сечения (рисунок 2). Конечного-элементная модель (КЭМ) мачты включает в себя все конструктивные элементы, воспринимающие или передающие нагрузки, а также определяющие жесткостные параметры рассматриваемой конструкции. Модель состоит из телескопической вышки, закрепленной на основании, допускается ее отклонение от оси и поддерживается силовыми тросами.



Рисунок 1а – Исследуемая мачта



Рисунок 1б – Исследуемая мачта

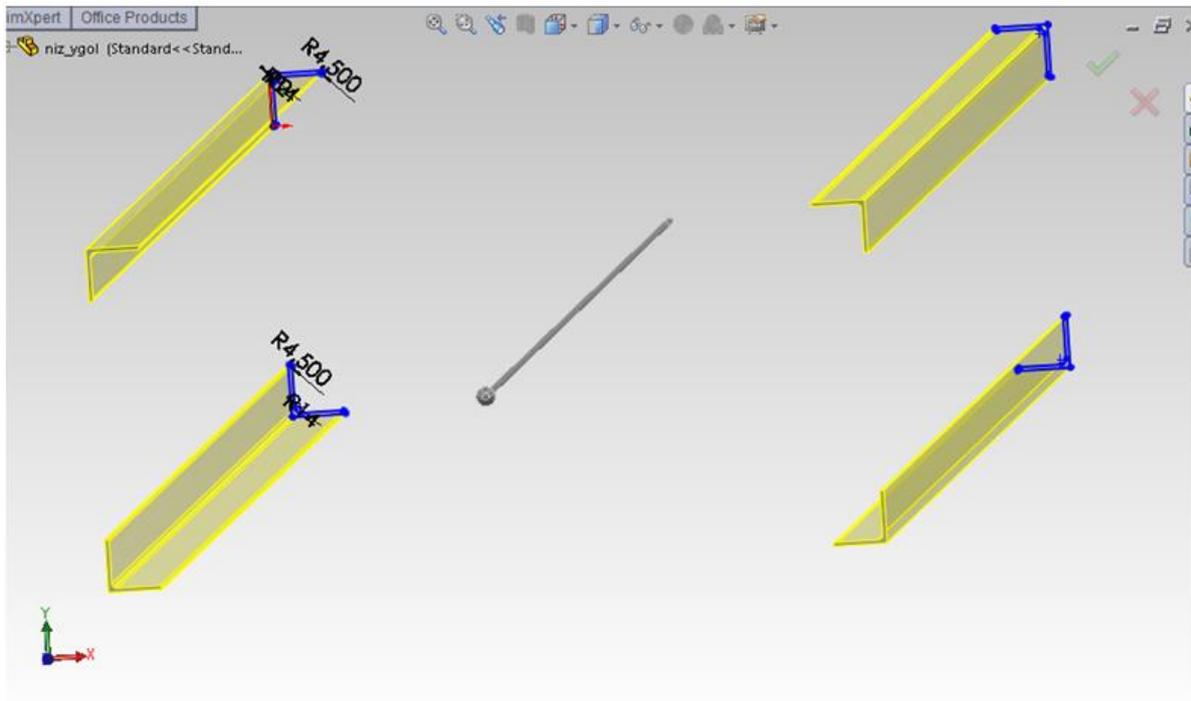


Рисунок 2 – Вид выбранного профиля

Однако, поскольку геометрические характеристики выбранного сечения уступают преждему (момент сопротивления), был проведен анализ мачты. Расчет проведен методом конечных элементов в программном комплексе ANSYS Workbench, который при нагружении конструкции внешними силами и давлением, гравитационными нагрузками и перемещениями, позволяет рассчитать напряженно-деформированное состояние рассматриваемой системы и сделать вывод о прочностных и жесткостных свойствах конструкции. Для выполнения расчетов на основе представленных чертежей создана КЭМ мачты (рисунок 3).

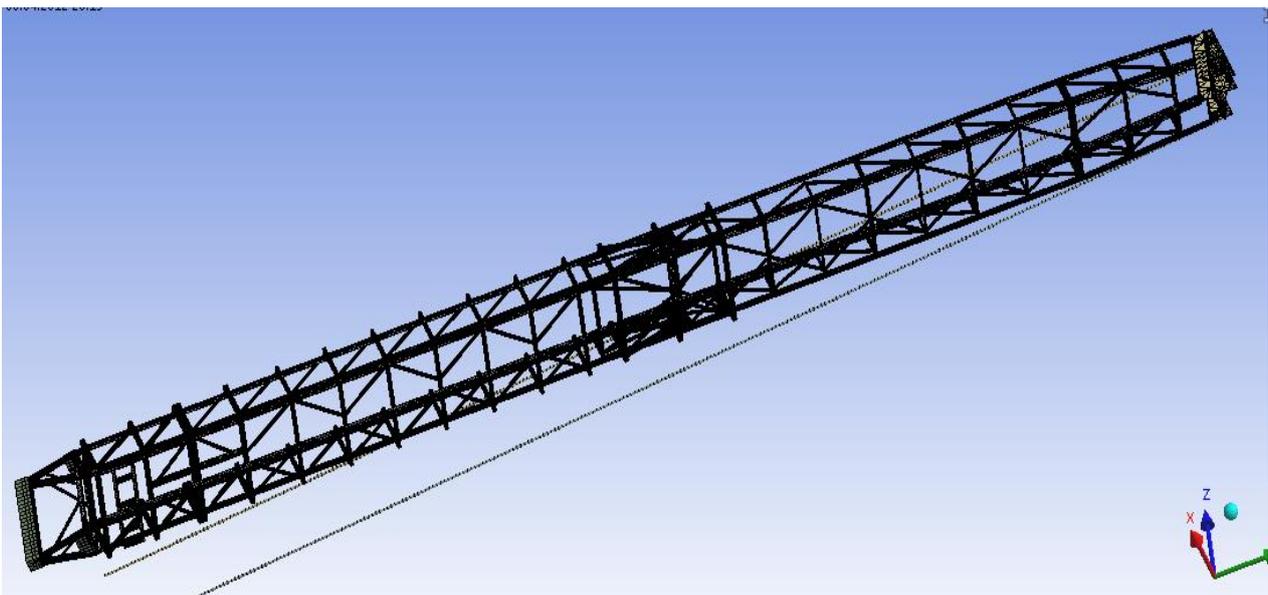


Рисунок 3 – Вид модели мачты

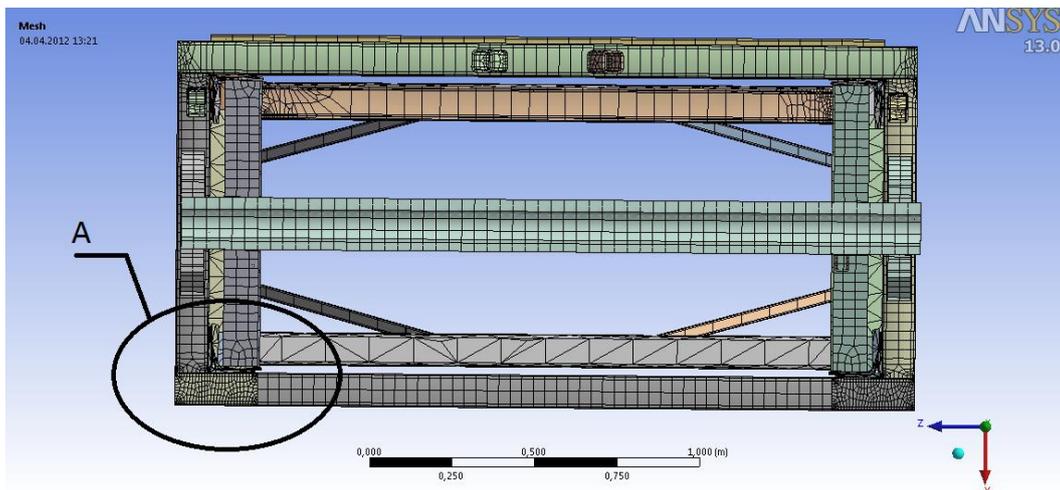


Рисунок 4 – Вид разреза в месте крепления нижней и верхней части

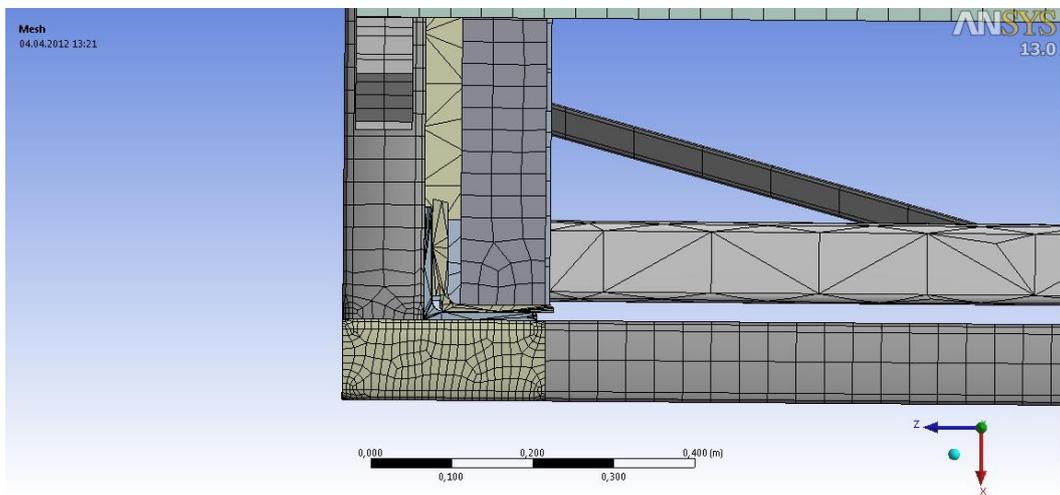


Рисунок 5 – Вид местного выреза А по рисунку 4

При расчете к вершине мачты была приложена сила в 800кН, приложенная к верхней платформе и направленная под углом 3^0 к оси мачты, в связи с особенностями эксплуатации мачты (рисунок 6).

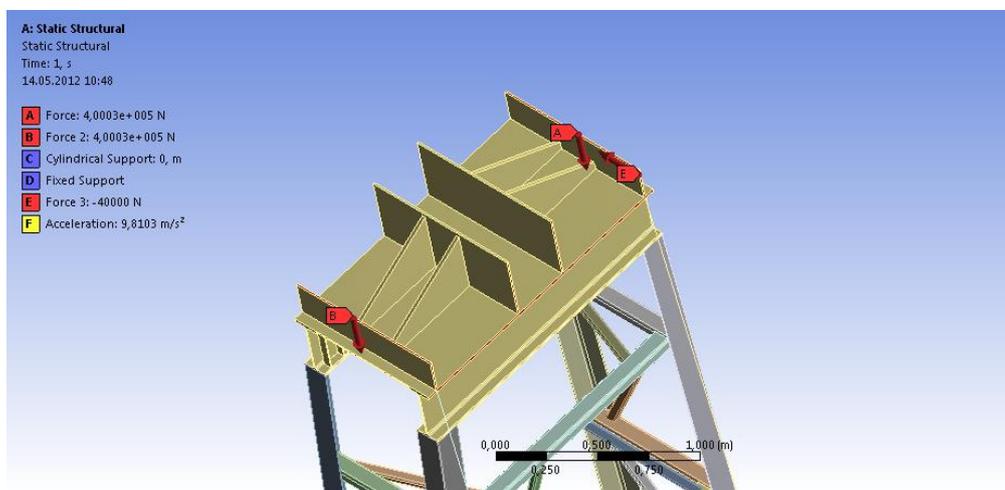


Рисунок 6 – Приложение нагрузок к вершине мачты

В ходе дальнейшего расчета получены эквивалентные напряжения конструкции рассчитываемые по формуле Губера-Мизеса:

$$\sigma_i = \sqrt{3J_2} = \sqrt{\frac{(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + (\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + (\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + 6(\sigma_{12}^2 + \sigma_{23}^2 + \sigma_{31}^2)}{2}},$$

где σ_{11} , σ_{22} , σ_{33} – главные, σ_{12} , σ_{31} , σ_{23} – касательные напряжения.

На рисунке 7 показано место сочленения верхней и нижней частей мачты в области, в которой наблюдаются наибольшие значения напряжений, что говорит о необходимости внесения конструкционных изменений.

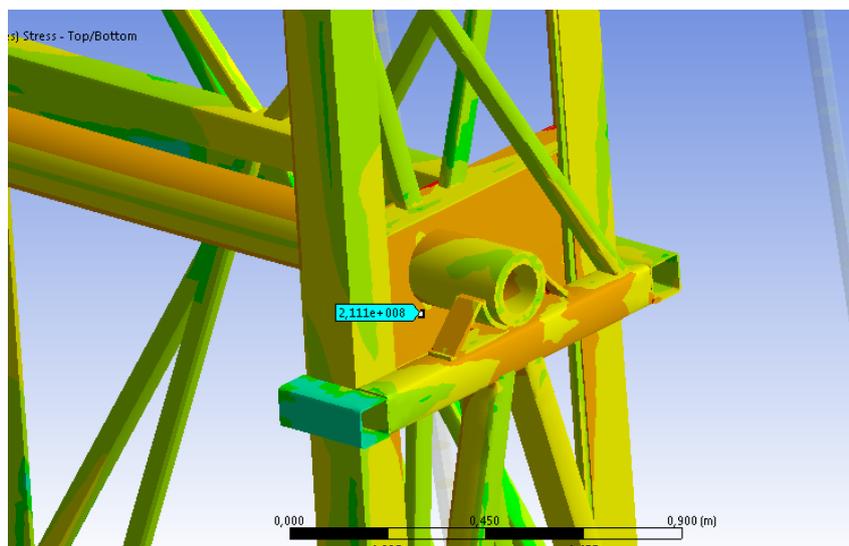


Рисунок 7 – Эпюра напряжений в области закрепления частей мачты

Поскольку рабочее положение мачты находится под углом к вертикали, то возникают также изгибающий момент, поэтому на рисунке 8, как в опасном месте, показаны возникающие напряжения. Значения которых в отмеченной области составляет 89-102МПа.

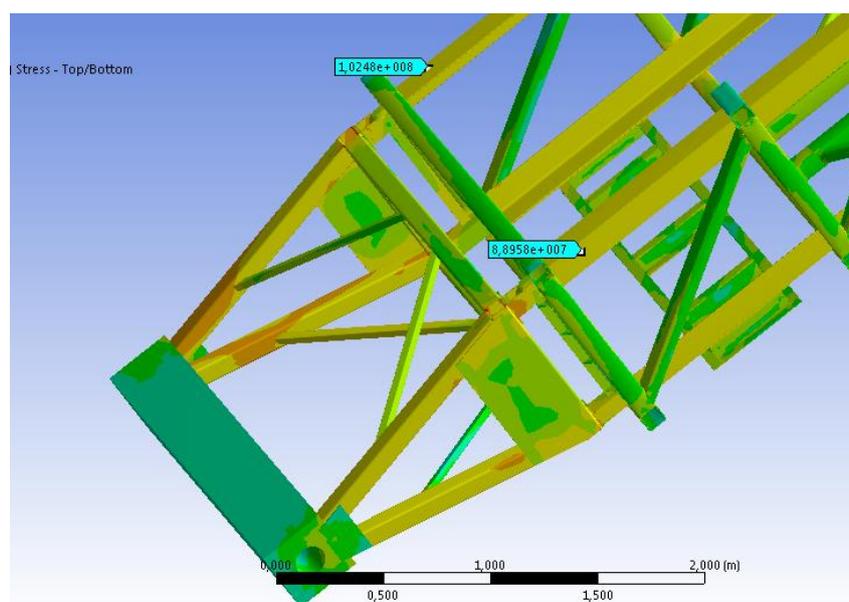


Рисунок 8 – Эпюра напряжений у основания мачты

На рисунке 9 представлена эпюра напряжений с первоначальной конструкцией. На ней видно, что напряжения у основания мачты не превышают 70 МПа.

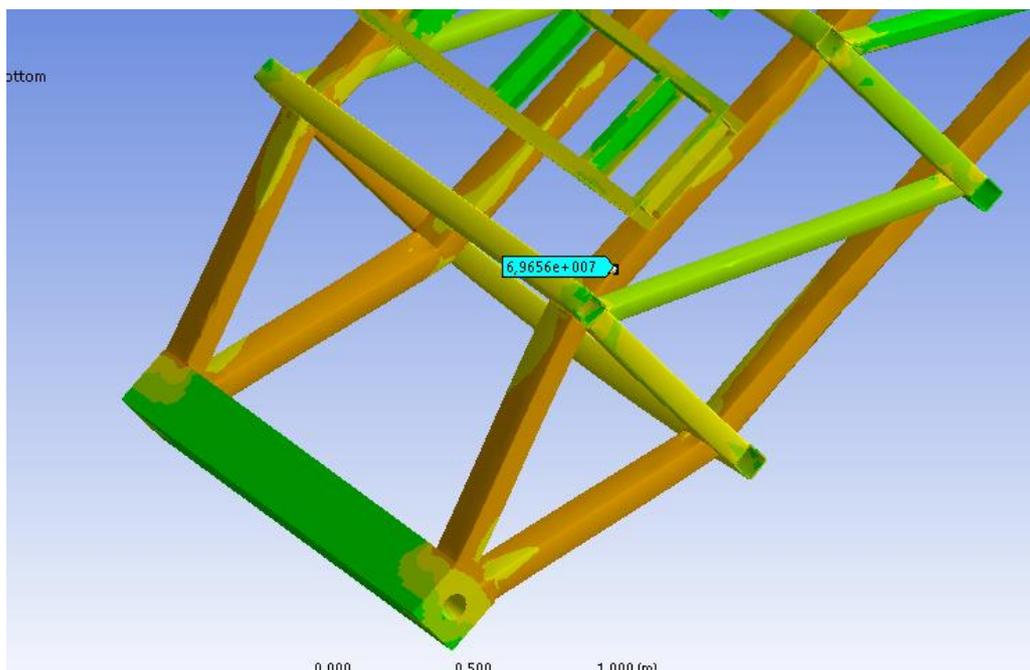


Рисунок 9 – Эпюра напряжений у основания мачты с несущими элементами в виде трубы прямоугольного сечения

В связи с особенностью горячекатаного равнополочного уголка (фактически отсутствует наружный радиус скругления (рисунок 10), что должно приводить к концентрации напряжений в этой области (краевой эффект).

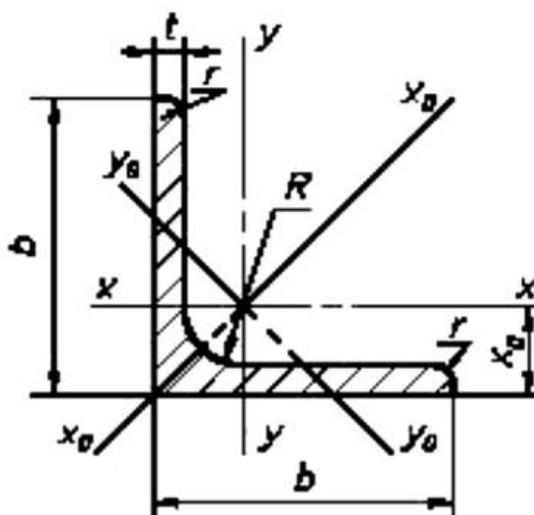


Рисунок 10 – Разрез уголка с требуемыми по ГОСТ 8509-93 размерами

На рисунках 11, 12 изображена часть конструкции, которая разбита на конечные элементы (рисунок 11), показано распределение напряжений по граням профиля (рисунок 12).

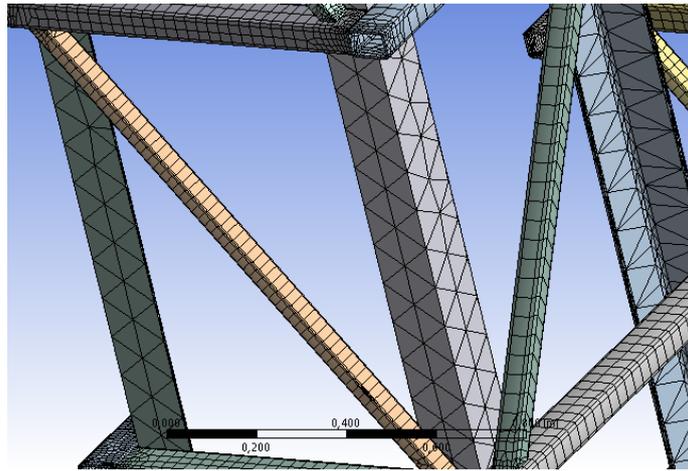


Рисунок 11 – Элемент мачты разбитый на КМ

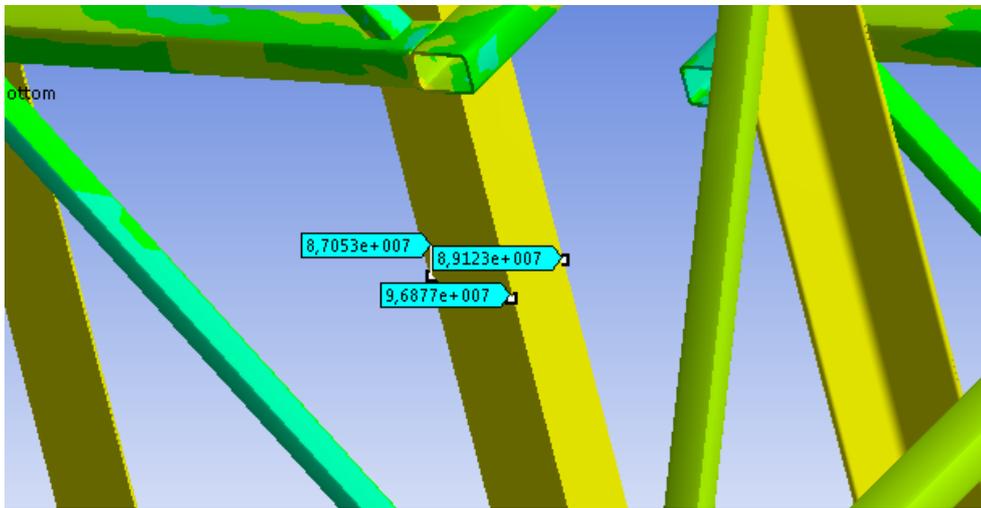


Рисунок 12 – Распределение напряжений по профилю уголка

На рисунке 13 показано перемещение элементов мачты от приложенной нагрузки. В верхней ее части перемещения равны $\Delta = 440$ мм.

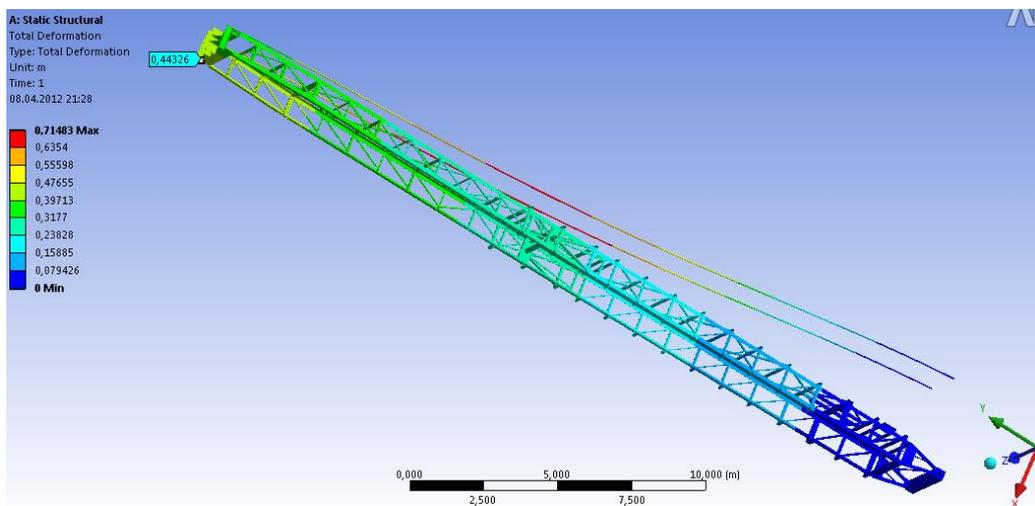


Рисунок 13 – Картина перемещений мачты от приложенной нагрузки

При замене элементов несущей конструкции была снижена ее масса:

$$\Delta m = m_1 - m_2 = 4530,9 - 3407,5 = 1123,4 \text{ кг,}$$

где

$$m_1 = 4 L m_{p1}=4 (15,82+15,35) 44,28 = 4530,9 \text{ кг;}$$

$$m_2 = 4 L m_{p2}=4 (15,82+15,35) 27,33 = 3407,5 \text{ кг;}$$

$$m_{p1} = 44,28 \text{ кг; } m_{p2} = 27,33 \text{ кг;}$$

m_{p1} , m_{p2} – масса погонного метра прямоугольной трубы и уголка соответственно.

Основные результаты и выводы

1. При замене несущих элементов конструкции с трубы прямоугольного сечения на равнополочный уголок напряжения возникающие в опасных местах конструкции не превышают 103 МПа, при прежней конструкции возникающие напряжения не превышали 70 МПа. Что говорит о возможности такой замены. Однако в месте сочленения частей мачты возникают большие напряжения, локально достигающие 210 МПа, что является неприемлемым, требует конструкторских изменений и дальнейшей работы.

2. При внесении вышеизложенных изменений в конструкцию ее масса снижается минимум на 1123,4 кг, что способствует большей ее мобильности и экономии средств выпускающего их предприятия.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Справочник металлиста : в 5 т. / С. А. Чернавский [и др.]. – Москва, 1958. – Т. 2. – 46 с.
2. Каплун А. Б. ANSYS в руках инженера / А. Б. Каплун, Е. М. Морозов, М. А. Ольферьев – Москва, 2003. – 29 с.
3. Кравчук, А. С. ANSYS для инженеров / А. В. Чигарев, А. С. Кравчук, А. Ф. Смалюк – Москва : Машиностроение, 2004 – 416 с.

УДК621.91.002

АНАЛИЗ ВЗАИМОСВЯЗИ ДОПУСТИМЫХ ПОГРЕШНОСТЕЙ СБОРОЧНЫХ РАБОТ И НЕПОДВИЖНЫХ КОМПЕНСАТОРОВ РАЗНОЙ ДЛИНЫ С ЧИСЛОМ СТУПЕНЕЙ КОМПЕСАЦИИ ПРИ ДОСТИЖЕНИИ ТОЧНОСТИ СБОРКИ МЕТОДОМ РЕГУЛИРОВАНИЯ

Медведев О. А., Гетман И. А., Вишневский А. И., Сульжиц В. И.

Брестский государственный технический университет,

г. Брест, Республика Беларусь

Метод регулирования широко используется для достижения высокой точности замыкающих звеньев длинных конструкторских сборочных размерных цепей машин в серийном производстве при экономически выгодных допусках составляющих звеньев. Он основан на быстром индивидуальном для каждого экземпляра собираемого узла изменении размера одного из составляющих звеньев – ком-

пенсатора. Изменение размера неподвижного компенсатора осуществляется ступенчато, выбором из заранее изготовленного комплекта компенсаторов. В идеальном случае ступень компенсации (разность размеров соседних компенсаторов в комплекте) равна допуску замыкающего звена, а число ступеней компенсации равно отношению величины компенсации к допуску замыкающего звена [1, 2].

Анализ способов расчета сборочных размерных цепей, используемых при достижении точности сборки методом регулирования [1, 2, 3, 4 и др.], позволил выявить их существенные недостатки: 1) ступень компенсации определяется без учета погрешностей сборочных работ и оснастки; 2) условие достижения точности сборки не учитывают погрешности формирования размера компенсатора; 3) в величину компенсации, кроме допусков составляющих звеньев сборочной конструкторской размерной цепи, включается допуск компенсатора и погрешности сборочных работ и оснастки, несмотря на то, что компенсатор не может компенсировать свои погрешности и погрешности формирования его размера, влияющие на выбор его размера; 4) не учитывается случайный характер составляющих величины компенсации и погрешностей, определяющих точность сборки.

Методика определения ступени и числа ступеней компенсации, основанная на анализе сборочных технологических размерных цепей, позволяет исправить отмеченные недостатки и повысить объективность расчетов размеров и числа компенсаторов. Далее изложены основные положения предлагаемой методики.

Размер неподвижного компенсатора, требуемого для отдельного экземпляра собираемого узла, в большинстве случаев находится измерением места под компенсатор, полученного при предварительной сборке узла без компенсатора, когда на место замыкающего звена устанавливается его эталон. Если размер выбранного компенсатора равен 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 измерения размера требуемого компенсатора. Замыкающим звеном в ней является размер 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 приобре-

тать 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 δ_z , погрешность установки эталона $\delta_{yз}$, погрешность измерения места под компенсатор δ_u , погрешность изготовления компенсатора $\delta_{ик}$, погрешность выбора компенсатора δ_v (отклонение номинального размера 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 ω_j звеньев, являющихся размерами деталей узла, участвующих в предварительной сборке (m звеньев кроме компенсатора). Приняв допущение о нормальном законе распределения слагаемых полей рассеяния, в соответствии с правилами теоретико-вероятностного расчета размерных цепей [1], получим

$$V = \sqrt{\sum_{j=1}^m \omega_j^2}.$$

С учетом анализа технологической цепи условие достижения точности сборки должно отражать соотношение допуска замыкающего звена TA_{Δ} конструкторской цепи и погрешностей, вызывающих отклонение размера места под компенсатор от размера выбранного компенсатора (в пределах использования компенсатора отдельной ступени). Применяв правило сложения полей рассеяния нормально распределенных случайных величин для указанных ранее погрешностей сборочных работ и оснастки получим условие достижения точности TA_{Δ}

$$TA_{\Delta} \geq \sqrt{\delta_z^2 + \delta_{yз}^2 + \delta_u^2 + \delta_{ик}^2 + \delta_v^2}.$$

При соблюдении этого условия замыкающее звено будет попадать в пределы его допуска для 99,73 % экземпляров собираемых узлов [1].

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 нужного размера из заранее изготовленного комплекта компенсаторов, в котором размеры 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 превращается в равенство, следует определять по формуле

$$S = \sqrt{TA_{\Delta}^2 - \delta_{\vartheta}^2 - \delta_{y\vartheta}^2 - \delta_u^2 - \delta_k^2}.$$

Число ступеней компенсации N определяется делением величины компенсации на ступень компенсации

$$N = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^m \omega_j^2}{TA_{\Delta}^2 - \delta_{\vartheta}^2 - \delta_{y\vartheta}^2 - \delta_u^2 - \delta_k^2}}.$$

Примененный при расчете числа ступеней компенсации способ сложения полей рассеяния позволяет существенно уменьшить число требуемых ступеней компенсации по сравнению со случаем арифметического сложения, при доле бракованных узлов 0,27 %.

Для определения размеров компенсаторов разных ступеней составлены схемы компенсации наглядно показывающие их взаимосвязи с границами замыкающего звена, границами величины компенсации, погрешностями сборочных работ и оснастки для трех типовых сочетаний, охватывающие все случаи реальных сборочных размерных цепей: увеличивающее суммарное составляющее звено (с полем рассеяния V) и уменьшающий компенсатор; увеличивающее суммарное составляющее звено и увеличивающий компенсатор; уменьшающее суммарное составляющее звено и увеличивающий компенсатор.

Разработанная методика апробирована на примере достижения точности сборки червячного редуктора 0119023-12.200, изготавливаемого на БСЗ ЗАО «Атлант». На рисунке представлена схема сборочной конструкторской размерной цепи, решение которой необходимо для достижения допустимого смещения A_1 торцов стакана и втулки, базирующих кольца подшипника. Прокладка с размером A_2 использовалась в качестве компенсатора.

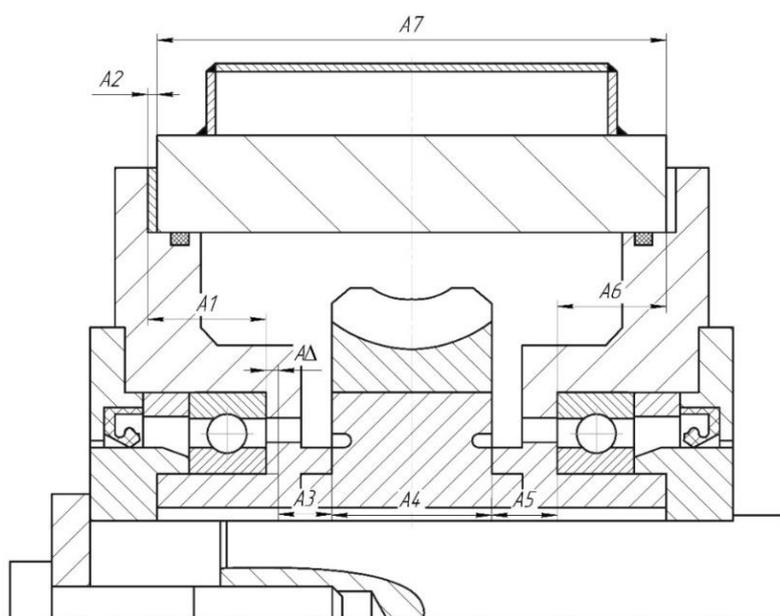


Рисунок – Схема сборочной размерной цепи червячного редуктора

Предлагаемая методика позволила повысить объективность расчетов величины компенсации, ступени и числа ступеней компенсации путем учета случайного характера погрешностей сборочных работ и 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. – СПб: Лань, 2020. – 512 с.: ил.
2. Солонин, И. С. Расчет сборочных и технологических размерных цепей / И. С. Солонин, С. И. Солонин – М. : Машиностроение, 1980 – 110 с.: ил.
3. Технология машиностроения (специальная часть): Учебник для машиностроительных специальностей вузов / А. А. Гусев [и др.] – М. : Машиностроение, 1986. – 480 с.
4. Балакшин, В. С. Основы технологии машиностроения / В. С. Балакшин. – М. : Машиностроение, 1969. – 358 с.

УДК 621.83.061.1

АНАЛИЗ МЕТОДИК ВЫБОРА МОТОР-РЕДУКТОРОВ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРИВОДОВ

Монтик С. В.

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

Надежность и долговечность электромеханического привода во многом зависит от правильности выбора применяемого мотор-редуктора. Выполним анализ используемых для этого методик. Сложившаяся в странах СНГ практика выбора мотор-редукторов несколько отличается от зарубежной.

При использовании зарубежной методики выбор мотор-редуктора происходит с применением сервис-фактора (FS), который учитывает режим эксплуатации мотор-редуктора.

Американская ассоциация производителей зубчатых колес (The American Gear Manufacturers Association) AGMA в стандарте ANSI/AGMA 2001-D04 [1] указывает, что сервис-фактор традиционно используется как множитель номинальной рабочей нагрузки для выбора из каталога разработанных редукторов и характеризует приложенные повышенные нагрузки, надежность, долговечность. Сервис-фактор задается для редуктора в зависимости от опыта эксплуатации в конкретной области применения. Сервис-фактор должен быть применен только для привода в сборе и в случае отсутствия более определенных данных о нагрузке.

ООО «НТЦ Приводная Техника» [2] для выбора модернизированных червячных (тип 7МЧ-М) и цилиндрико-червячные (тип 7МЦЧ-М) мотор-редукторов собственного производства, сборка которых производится как из импортных, так

и из отечественных комплектующих, рекомендует использовать зарубежную методику с применением сервис-фактора (коэффициента эксплуатации) FS [2, 3].

Для определения сервис-фактора необходимо знать: характер нагрузки, продолжительность работы привода в сутки, число включений в час.

Продолжительность работы в сутки и число включений в час назначаются исходя из технологического процесса или технического задания на проектирование электромеханического привода технологического оборудования.

Характер нагрузки определяется по соотношению моментов инерции ротора электродвигателя I_p , кг · м² и момента инерции нагрузки, приведенного к ротору электродвигателя $I_{пр}$, кг · м². Приведенный момент инерции нагрузки определяется:

$$I_{пр} = I_{НАГР}/i^2, \quad (1)$$

где $I_{НАГР}$ – момент инерции нагрузки на выходном валу редуктора, кг · м²; i – передаточное отношение редуктора.

Нагрузки условно делятся на три группы:

– «А» – спокойная безударная, момент инерции ротора двигателя больше момента инерции нагрузки, приведенного к быстроходному валу: $I_p > I_{пр}$ (это условие почти всегда выполняется, если передаточное отношение редуктора достаточно велико);

– «В» – нагрузка с умеренными ударами, момент инерции нагрузки, приведенный к быстроходному валу не более чем в три раза превышает момент инерции ротора двигателя: $I_{пр}/I_p < 3$;

– «С» – нагрузка с сильными ударами – приведенный момент инерции более чем в три раза превышает момент инерции ротора электродвигателя: $I_{пр}/I_p > 3$.

Сервис-фактор определяется как произведение двух коэффициентов:

$$FS = f_B \cdot f_A, \quad (2)$$

где f_B – коэффициент, зависящий от характера нагрузки и продолжительности работы привода в сутки; f_A – коэффициент, зависящий от числа включений в час.

Выбор типоразмера мотор-редуктора осуществляется из каталога, исходя из требуемой мощности привода P_1 , кВт, частоты вращения выходного вала мотор-редуктора n_2 , мин⁻¹, крутящего момента на выходном валу M_2 , Н · м, расчетного сервис-фактора FS . При это следует выбирать мотор-редуктор с ближайшим большим сервис-фактором.

Указанные в таблицах каталога сервис-фактор FS показывает связь между максимально допустимым моментом M_{2lim} , передаваемым мотор-редуктором, и крутящим моментом на выходном валу M_2 [2]:

$$FS = M_{2lim}/M_2. \quad (3)$$

Также при выборе мотор-редуктора необходимо учитывать требуемый ресурс работы мотор-редуктора, т. к. в каталоге приводятся параметры для ресурса 15000 мото-часов. Для вычисления предельно допустимого момента для редуктора или сервис-фактора для мотор-редуктора при других значениях ресурса L необходимо умножить приведенные в каталоге значения на поправочный коэффициент [2]:

$$M_{2L} = M_{2\ 15000ч} \cdot K, \quad (4)$$

$$FS_L = FS_{15000ч} \cdot K. \quad (5)$$

Так, для ресурса 10 000 мото-часов (именно такой ресурс применяется в расчетах большинства производителей компонентов электромеханического привода) значение поправочного коэффициента будет равно 1,15 [2].

Аналогичный подход для определения сервис-фактора для червячных редукторов и мотор-редукторов серии NMRV используется итальянской компанией MOTOVARIO, но с учетом температуры окружающей среды [4]. Если требуется подобрать мотор-редуктор по крутящему моменту на выходном валу M_2 , то следует определить требуемый максимальный крутящий момент развиваемый редуктором:

$$M_{2n} \geq M_2 \cdot FS, \quad (6)$$

где FS – сервис-фактор, M_{2n} – ближайшее большее значение из таблиц с техническими характеристиками мотор-редукторов [4].

Действующий в странах СНГ межгосударственный стандарт ГОСТ 21354-87 «Передачи зубчатые цилиндрические эвольвентные внешнего зацепления. Расчет на прочность» вводит понятие о типовых и эквивалентных режимах нагружения. Были проведены исследования для установления соответствия между значениями сервис-фактора и типовыми режимами нагружения, которые показали, что, несмотря на разные методы определения между данными параметрами, существует однозначная зависимость (см. таблицу 1) [3].

Таблица 1 – Соответствие между режимами нагружения и значением сервис-фактора [3]

Типовой режим нагружения по ГОСТ 21354	0 Постоянный	1 Тяжелый	2 Средний равновероятный
Сервис-фактор FS	2,8 – 3,0	2,4 – 2,6	1,8 – 2,0
Типовой режим нагружения по ГОСТ 21354	3 Средний нормальный	4 Легкий	5 Особо легкий
Сервис-фактор FS	1,8–2,0	1,4–1,6	1,1–1,3

В НТЦ «РЕДУКТОР» предлагают свою методику выбора типоразмера мотор-редуктора [5]. Мотор-редукторы, применяемые в приводах промышленного оборудования, эксплуатируются в самых различных условиях и режимах работы, что необходимо учитывать при выборе мотор-редуктора, поэтому исходными данными для выбора являются: расчетный крутящий момент T_{2P} , воспринимаемый выходным валом мотор-редуктора и соответствующий нормально протекающему (установившемуся) процессу работы приводимого механизма, Н·м; расчетная частота вращения выходного вала n_{2P} , мин⁻¹; расчетная радиальная консольная нагрузка F_{RAP} на выходном валу мотор-редуктора, Н; требуемая долговечность червячного зацепления, ч; характер внешней нагрузки; время работы в сутки, ч; количество пусков в час; продолжительность включения в течение одного часа (ПВ), %; тип применяемой смазки; наличие упругих элементов (муфты, ремни и др.) на выходном валу мотор-редуктора; наличие реверсивного движения; режим ввода в эксплуатацию; температура окружающей среды, °С.

Также следует учесть требуемые конструктивные особенности мотор-редуктора: вариант сборки; вариант расположения мотор-редуктора в пространстве (червячный вал под колесом, червячный вал над колесом, вал колеса вертикальный, червячный вал вертикальный); конструктивное исполнение по способу монтажа (на лапах, на фланце, с реактивной штангой); особенности исполнения выходного вала; особенности исполнения электродвигателя; габаритные и присоединительные размеры.

Первоначально, учитывая требуемую частоту вращения выходного вала, n_{2P} определяют тип мотор-редуктора. В случае, если для данной частоты возможно использовать разные типы мотор-редукторов, выбирается лучший вариант, соответствующий тем или иным существенным требованиям эксплуатации: с максимальным крутящим моментом или КПД, с минимальными габаритами и массой, с наибольшими долговечностью и экономичностью.

Исходя из условий и режимов эксплуатации мотор-редуктора, определяем значение эксплуатационного коэффициента $K_{Э}$, учитывающего фактический режим работы мотор-редуктора, по формуле [5]:

$$K_{Э} = K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4 \cdot K_5 \cdot K_6 \cdot K_7 \cdot K_8, \quad (7)$$

где K_1 – коэффициент характера эксплуатации редуктора; K_2 – коэффициент смазки; K_3 – коэффициент наличия упругих элементов; K_4 – коэффициент реверсивных пусков; K_5 – коэффициент режима ввода редуктора в эксплуатацию; K_6 – коэффициент расположения червячной передачи в пространстве при расположении червячной пары выходной ступени; K_7 – температурный коэффициент; K_8 – коэффициент долговечности. Если значение $K_{Э} > 3$, то для дальнейших расчетов принимается $K_{Э} = 3$.

Для определения типоразмера мотор-редуктора находим значение расчетно-эксплуатационного крутящего момента $T_{2PЭ}$ на его выходном валу по формуле

$$T_{2PЭ} = T_{2P} \cdot K_{Э}. \quad (8)$$

Далее по каталогу данного производителя по техническим характеристикам мотор-редукторов выбирают минимально допустимый типоразмер мотор-редуктора, который удовлетворяет условиям $n_2 \approx n_{2P}$, $T_2 \geq T_{2PЭ}$. Для выбранного мотор-редуктора также сравнивают расчетную величину радиальной консольной нагрузки на выходном валу с допускаемой.

Данная методика наиболее полно учитывает условия работы мотор-редуктора, при этом коэффициент характера эксплуатации редуктора K_1 наиболее близок по значению к сервис-фактору.

Каждую из рассмотренных методик выбора мотор-редуктора следует применять для продукции конкретного производителя.

Выполним подбор червячного мотор-редукторов для электромеханического привода подъемника (прототип модель ПЛД-3 [6]). Требуемые параметры привода подъемника определялись по методике, изложенной в [7]. В результате расчета были получены следующие параметры для выбора мотор-редуктора: крутящий момент на выходном валу $M_2 = 65,5 \text{ Н} \cdot \text{м}$; частота вращения выход-

ного вала $n_2 = 124,8 \text{ мин}^{-1}$; требуемая мощность электродвигателя $P_1 = 1,1 \text{ кВт}$; частота вращения вала электродвигателя (частота на входном валу мотор-редуктора) $n_1 = 1400 \text{ мин}^{-1}$ (синхронная частота 1500 мин^{-1}); требуемое передаточное отношение мотор-редуктора составляет $i = 11,21$; требуемый ресурс мотор-редуктора $10\,000$ мото-часов.

Выполняем подбор червячного мотор-редуктора ООО «НТЦ Приводная Техника» типа 7МЧ-М по методике, изложенной в [2]. Исходя из режима работы подъемника значение сервис-фактора составляет $FS=0,8$. Выбираем мотор-редуктор 7МЧ-М-60 со следующими параметрами: $n_2 = 140 \text{ мин}^{-1}$; $i = 10$; $M_2 = 63 \text{ Н} \cdot \text{м}$; $FS=2,1$; $P_1 = 1,1 \text{ кВт}$. Значение крутящего момента ниже требуемого, однако с учетом требуемого ресурса крутящий момент $M_{2_{10000ч}} = 72,45 \text{ Н} \cdot \text{м}$.

При выборе червячного мотор-редуктора НТЦ «РЕДУКТОР» по методике [5] значение эксплуатационного коэффициента $K_3 = 0,94$; расчетно-эксплуатационный крутящий момент на выходном валу $T_{2PЭ} = 61,57 \text{ Н} \cdot \text{м}$. Выбираем мотор-редуктор МЧ-63 со следующими параметрами: $n_1 = 1500 \text{ мин}^{-1}$; $n_2 = 120 \text{ мин}^{-1}$; $i = 12,5$; $T_2 = 93 \text{ Н} \cdot \text{м}$; $P_1 = 1,3 \text{ кВт}$; КПД мотор-редуктора $\eta = 0,88$.

Рассмотренные методики выбора мотор-редукторов могут использоваться студентами специальности 1 – 37 01 06 Техническая эксплуатация автомобилей при проектировании привода электромеханического подъемника при выполнении курсового проекта по дисциплине «Механизация процессов технической эксплуатации».

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. ANSI/AGMA 2001-D04, Fundamental Rating Factors and Calculation Methods for Involute Spur and Helical Gear Teeth [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.agma.org/standards/ansi-agma-2001-d04/>. – Дата доступа: 28.09.2022.
2. Сайт ООО «НТЦ Приводная Техника». Редукторы и мотор-редукторы. Технический каталог [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://privod.ru/upload/files/Каталог_механика_полный.pdf. – Дата доступа: 28.09.2022.
3. Сайт ООО «НТЦ Приводная Техника». Инструкция по эксплуатации. Мотор-редукторы 7-й серии [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://privod.ru/upload/files/Инструкция_по_эксплуатации_7МЧМ_версия_13-12-18.pdf – Дата доступа: 28.09.2022.
4. Сайт ООО «Редуктор». Сервис-фактор [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://motor-reduktor-nmrv.ru/content/reduktor/pics/catalog/service-factor-worm-gear-reducer.pdf>. – Дата доступа: 28.09.2022.
5. Сайт НТЦ «РЕДУКТОР». Редукторы, мотор-редукторы червячные модернизированные. Каталог [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://reduktorntc.ru/wp-content/uploads/Reduktory-i-motor-reduktory-chervyachnye-modernizirovannye-seriya-M.pdf> – Дата доступа: 28.09.2022.
6. Подъемник ПЛД-3. Руководство по эксплуатации [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.asopskov.ru/storage/repeater_catalog_docs/doc_22_0.pdf. – Дата доступа: 28.09.2022.

7. Методические указания к выполнению курсовой работы по дисциплинам «Средства технического оснащения автосервиса», «Механизация процессов технической эксплуатации» для студентов специальностей 1-37 01 07 «Автосервис», 1-37 01 06 «Техническая эксплуатация автомобилей» : в 2 частях / сост. С.В. Монтик, Я. А. Акулич, Ф. М. Санюкевич. – Брест : БрГТУ, 2019. – Часть 2. – 42 с.

УДК 517.2, 519.7, 531.36, 681.3.06

О РЕШЕНИИ ОДНОЙ МОДЕЛЬНОЙ ЗАДАЧИ ОПТИМАЛЬНОГО КОНСТРУИРОВАНИЯ

Назаров С., Рахимов М., Аннабердиев Ш.

Государственный энергетический институт Туркменистана

1. В работе предлагается аналитическое решение одной модельной задачи оптимального конструирования динамики движения материальной точки, которая возникает при производстве и расчете параметров различных технических конструкций. Движение рассматриваемой материальной точки $x(t)$ при каждом t в начальный период времени происходит в «цилиндрической трубке» длины l . В начальный момент времени ($t = 0$) материальная точка принимает точное (импульсное) возмущение со скоростью ϑ_0 , под действием которой «цилиндрическая трубка» как стержень совершает продольные колебания вдоль своей оси симметрии or . После сравнительно короткого времени $t = \tau$ материальная точка, вылетая из трубки, совершает полет вдоль продолжения симметрии трубки [1–3].

Допустим, что при настильной стрельбе центр тяжести материальной «точки-снаряда» движется равномерно и прямолинейно. Движение снаряда вокруг центра масс характеризуется следующими величинами [3]:

α – углом между осью и направлением движения снаряда;

β – углом между осью снаряда и ее проекцией на вертикальную плоскость;

n – проекцией угловой скорости вращения снаряда на его ось.

Известно, что при малых n снаряд начинает «кувыркаться» в полете. При этом α и β сильно меняются и точность стрельбы резко падает. Наоборот, при больших n «кувырканий» не происходит, углы α и β незначительно меняются во время полета и при этом достигается меньшее рассеивание снаряда. Изменяя параметры нарезки ствола орудия, можно менять n и тем самым добиваться устойчивости полета снаряда.

Пусть C – момент инерции снаряда относительно его оси; A – момент инерции относительно вертикальной оси, проходящей через центр тяжести; l – расстояние от центра давления (так называется точка, где приложены силы сопротивления воздуха); R – лобовое сопротивление.

Найдено необходимое и достаточное условие (условие Маиевского – Крылова) устойчивости полета без «кувырканий» [3]:

$$n^2 > \frac{AlR}{C^2}. \quad (\text{МК})$$

Цель задачи заключается в следующем: при выполнении условий (МК), выявить какова должна быть функциональная зависимость параметров конструкции, участвующих во внешней силе (сопротивление и нарезки трубки, давления газа, начальная скорость материальной точки, граничные условия и другие), для того чтобы материальная точка, совершая полет по определенному закону, точно попадала в заданную точку за наименьшее время T .

Предлагаемая математическая модель поставленной задачи может быть записана в следующем виде: трубка как стержень совершает продольные колебания вдоль своей оси симметрии [1,2]:

$$u_{tt} - a^2 u_{rr} = p(t, r, x(t), x'(t)), \quad 0 < t < \tau, \quad (1)$$

$$u(0, r) = 0, u_t(0, r) = h(r), \quad 0 \leq r \leq 1, \quad (2)$$

$$\begin{cases} u(t, 0) = v(t) \equiv v, & v(0) = 0, & 0 \leq t \leq \tau < T, \\ u_{tt}(t, 1) + a^2 u_r(t, 1) = \mu(t, x(t), x'(t)), \end{cases} \quad (3)$$

где a – коэффициент, учитывающий массу материальной точки; (1) – (3) – предельная краевая задача. Правая часть второго граничного условия (3) характеризует закон движения материальной точки в трубке, а функция $\mu(t, x(t), x'(t))$ в граничном режиме подвергает возмущение, в результате чего трубка совершает продольное колебание. Заметим, граничное условие (3) может содержать слагаемое с $u_{tt}(t, 1)$. Материальная точка $x(t)$ при каждом t , $0 \leq t \leq T$, вылетая со ствола, совершает прямолинейное движение вдоль продолжения оси симметрии трубки и удовлетворяет следующему уравнению:

$$x''(t) = f(t, x(t), x'(t), y(t)), \quad 0 \leq t \leq T, \quad y(0) = 0, \quad (4)$$

$$x(0) = 0, \quad x'(0) = v_0, \quad |v_0| \leq N; \quad (5)$$

$$x(T) = x_1, \quad x'(T) = x_2. \quad (6)$$

Правая часть уравнения (4), т. е. функция f зависит от $x(t)$ – состояния и $\dot{x}(t)$ – скорости материальной точки, сопротивления и нарезки трубки, давления газа, от конструкции трубки и свободного параметра $y = y(t)$ из кусочно-непрерывного на $0 \leq t \leq T$ класса функций $Y[0, T]$, т. е. $y(t) \in Y[0, T]$.

В начальных условиях (5) v_0 определяется из точечного взрыва в трубке, конечные условия $x(T) = x_1$, $\dot{x}(T) = x_2$ из (6) означает точное попадание в фиксированную точку (x_1, x_2) фазовой плоскости ox_1x_2 ; T – конец процесса полета «снаряда» заранее не зафиксирован; ищется минимальное его значение.

В качестве управляющих параметров примем числовой параметр v_0 , также функции: $y \equiv y(t)$, $v \equiv v(t)$; $\mu \equiv \mu(t) \equiv \mu(t, x(t), x'(t))$, $p \equiv p(t, r) \equiv p(t, r, x(t), x'(t))$. Заметим, что (4), (5) есть задача оптимального быстрогодействия и она может быть решена отдельно, т. е. независимо от (1) – (3). При найденном решении задачи (4) – (6) решение задачи (1) – (3) должно обеспечить оптимальность полета снаряда по быстродействию, тем самым задача (1) – (3) есть задача оптимального конструирования для волнового уравнения с начально-краевыми условиями и критерием оптимальности на минимум функционала по квадратично суммируемым функциям v, μ, p :

$$\int_t^\tau \left\{ \int_0^1 [\alpha_0(u - \varphi)^2 + \alpha_1(u_t - \psi)^2 + \alpha_2 p^2] dr + \beta_0 u_t^2(t, 1) + \beta_1 v^2 + \beta_2 \mu^2 \right\} d\xi, \quad (7)$$

где $t = 0$; $t \leq \xi \leq \tau$; $\alpha_i \geq 0$; $\beta_i \geq 0$ – числа, не обращающиеся одновременно в нуль; $\varphi = \varphi(t, r)$, $\psi = \psi(t, r)$ – заданные функции; $t < \xi < \tau$.

2. Поставленная задача при определенных условиях на исходные данные имеет решения в классе обобщенных функций.

Приведем уравнение (4) к системе двух уравнений. Для этого введем новые переменные: $x_1(t) = x(t)$, $x_2(t) = \dot{x}(t) = \dot{x}_1(t)$.

Тогда $\dot{x}_2(t) = \ddot{x}(t) = f(t, x_1(t), x_2(t), y(t))$. Для простоты будем считать правая часть уравнения (4) не зависит от t , т. е. рассмотрим автономную систему:

$$\begin{cases} \dot{x}_1(t) = x_2(t) \equiv f_1(x_2(t)), 0 \leq t \leq T, \\ \dot{x}_2(t) = f_2(x_1, x_2, y) \equiv f(x_1(t), x_2(t), y(t)), y(t) \in Y[0, T], y(0) = 0 \end{cases} \quad (8)$$

Начальные условия (5) принимает вид:

$$x_1(0) = 0, x_2(0) = v_0. \quad (9)$$

Из условия (6) на конец управления (конечная цель – точное попадание в точку) получим:

$$x_1(T) = x_1, x_2(T) = x_2. \quad (10)$$

Будем называть пара управлений (y, v_0) , $y = y(t)$, удовлетворяющих условиям $y(t) \in Y[0, T]$, $|v_0| \leq N$ допустима, если эта пара систему (8) переводит из положения (9) в конечное состояние (10).

Для решения задачи (8) – (10) используем принцип максимума Л. С. Понтрягина [4]. Обозначим через $\Omega = \{y(t), v_0; y(t) \in Y[0, T], |v_0| \leq N\}$ множество допустимых управлений y и v_0 , переводящих систему из любой точки $(0, v_0)$ фазового пространства, т. е. из любого положения $(0, v_0)$ системы в заданную точку (x_1, x_2) . Допустим, что множество Ω не пусто. Предположим, что функция f удовлетворяет условию Липшица по всем переменным и достигает своих минимальных и максимальных значений по $y(t)$:

$$N_1(t) \leq f \equiv f(t, x(t), x'(t), y(t)) \leq N_2(t); \quad N_1(t) \leq N_2(t). \quad (11)$$

Оптимальное управление, т. е. $y^{opt}(t)$ функция в промежутке $0 \leq t \leq T$ ищется в классе кусочно-непрерывных функций в Ω .

Определим две вспомогательные функции $\psi_1(t)$ и $\psi_2(t)$ из следующей системы обыкновенных дифференциальных уравнений:

$$-\psi_1'(t) = \psi_2(t)f'_{2x_1}(t, x_1, x_2, y^{opt}); \quad -\psi_2'(t) = \psi_1(t) + \psi_2(t)f'_{2x_2}(t, x_1, x_2, y^{opt})$$

и составим функцию Понтрягина:

$$\begin{aligned} H(\psi_1, \psi_2, x_1(t), x_2(t), y(t)) &= \\ &= \psi_1(t)f_1(x_2(t)) + \psi_2(t)f(t, x_1(t), x_2(t), y(t)), t \in [0, T]. \end{aligned}$$

Согласно принципу максимума имеем: если при заданном $f_2(x_1(t), x_2(t), y(t))$ на множестве Ω существует верхняя грань функции Понтрягина, т. е. существует

$$M(\psi_1, \psi_2, x_1, x_2) = \sup_{\substack{y(t) \in Y[0, T] \\ |v_0| \leq N}} H(\psi_1, \psi_2, x_1, x_2, y), \quad (12)$$

и, кроме этого, если конечный момент T управлений выполняется условие

$$M(\psi_1(T), \psi_2(T), x_1(T), x_2(T)) \geq 0, \quad (13)$$

то управления $y^0 = y^0(t)$ и v_0^0 , определенные из условий (12), (13) являются оптимальными, т. е. обеспечивают перевод системы (8) из положения (9) в состояние (10) за минимальное время T^0 . При этом состояние $(x_1^0 = x_1^0(t), x_2^0 = x_2^0(t))$ системы, определенное из системы (8) и начального условия (9) при управлениях $y^0 = y^{opt}(t)$ и v_0^0 является оптимальным состоянием системы.

Теорема

Допустим, что в задаче (4) – (6) функция f по совокупности аргументов непрерывна и имеет непрерывные частные производные и удовлетворяет условию (11). Тогда решение задачи оптимального быстрогодействия (4) – (6) определяется из следующих соотношений:

$$v_0^{opt} = N, \text{ если } \psi_1(0) > 0; v_0^{opt} = -N, \text{ если } \psi_1(0) < 0;$$

$$y^{opt} = y_2^0(t), \text{ если } \psi_2(t) > 0; y^{opt} = y_1^0(t), \text{ если } \psi_2(t) < 0,$$

где функции $y_2^0(t), y_1^0(t) \in Y[0, T]$ определяются из условия оптимальности управляющей функции $y(t)$, т. е. из условий минимальных и максимальных значений заданной функции f :

$$N_1(t) = f(t, x(t), x'(t), y_1^0(t)), \quad N_2(t) = f(t, x(t), x'(t), y_2^0(t)).$$

Теперь при найденном оптимальном управлении, т. е. оптимальном движении $x_1^0 = x_1^0(t) \equiv x^0(t)$ материальной точки, приняв в качестве управляющих функций $p(t, r)$ и $\mu(t, x(t)) \equiv \mu(t)$, методом динамического программирования можно решить задачу (1) – (3), (4) оптимального конструирования регуляторов в различных постановках, т. е. можно конструировать технические параметры ствола.

3. Для решения задачи (1) – (3), (6) применяем метод динамического программирования. Введем функционал Беллмана [5] ($0 \leq t \leq \tau < T$):

$$S = S[t, w(t, \cdot), u_t(t, 1)] = \min_{p, v, \mu} Q(t, p, v, \mu), \quad w = w(t, r) = \{u(t, r), u_t(t, r)\},$$

где $Q(t, p, v, \mu)$ обозначает интеграл (7). Согласно формализму метода динамического программирования предполагается, что функционал Беллмана имеет частные функциональные производные. Выведено уравнение Беллмана:

$$S_t[\tau, w(\tau, \cdot), u_t(\tau, 1)] = 0; v_2(t, 0) = v_{2r}(t, 1) = 0; 0 \leq t \leq \tau < T.$$

$$-S_t = \min_{p, v, \mu} \{ \beta_0 u_t^2(t, 1) + \beta_1 v^2(t) + a^2 v_{2r}(t, 0) v(t) + \beta_2 \mu^2 + \mu v_2(t, 1) +$$

$$+ \int_0^1 [\alpha_0 (u - \varphi)^2 + \alpha_1 (u_t - \psi)^2] dr + \int_0^1 [v_1 u_t + a^2 v_{2rr} u + v_2 p + \alpha_2 p^2] dr \}.$$

Получены формулы для оптимального синтеза:

$$p(t, r) = -\left(\frac{1}{2\alpha_2}\right) v_2(t, r); \mu(t) = -\left(\frac{1}{2\beta_2}\right) v_2(t, 1); v(t) = -\left(\frac{a^2}{2\beta_1}\right) v_{2r}(t, 0). \quad (14)$$

Подставив значения управляющих функций из (14) в уравнении Беллмана, для определения оптимального функционала получим нелинейное интегродифференциальное уравнение в частных функциональных производных:

$$-S_t = \beta_0 u_t^2(t, 1) - (1/4\beta_1) a^4 v_{2r}^2(t, 0) - (1/4\beta_2) v_{2r}^2(t, 1) +$$

$$+ \int_0^1 [\alpha_0 (u - \varphi)^2 + \alpha_1 (u_t - \psi)^2] dr + \int_0^1 \left[v_1 u_t + a^2 v_{2rr} u - \frac{1}{4\alpha_2} v_2^2 \right] dr.$$

Заметим, что управляющие функции определены с помощью функциональной производной $v_2(t, r)$ функционала S . Вектор-функция $w(t, r)$ определяется с помощью функциональных производных $v_1 = v_1(t, r)$, $v_2 = v_2(t, r)$ функционала S . Решение уравнения Беллмана ищем в квадратичной форме:

$$S[t, w(t, \cdot), u_t(t, 1)] = \int_0^1 \int_0^1 w^*(t, r) K(t, r, \xi) w(t, r) dr d\xi + \int_0^1 R(t, r) w(t, r) dr + \eta(t); R(t, r) = \{R_1(t, r), R_2(t, r)\};$$

$$K(t, r, \xi) = \|K_{ij}(t, r, \xi)\| \equiv K(t, \xi, r), K_{12} = K_{21}.$$

Вычислены функциональные производные:

$$v_1(t, r) = 2 \int_0^1 [K_{11}(t, r, \xi) u(t, \xi) + K_{12}(t, r, \xi) u_t(t, \xi)] d\xi + R_1(t, r),$$

$$v_2(t, r) = 2 \int_0^1 [K_{12}(t, r, \xi) u(t, \xi) + K_{22}(t, r, \xi) u_t(t, \xi)] d\xi + R_2(t, r),$$

$$v_{2rr}(t, r) = 2 \int_0^1 [K_{12rr}(t, r, \xi) u(t, \xi) + K_{22rr}(t, r, \xi) u_t(t, \xi)] d\xi + R_{2rr}(t, r),$$

$$v_{2r}(t, 0) = 2 \int_0^1 [K_{12r}(t, 0, \xi) u(t, \xi) + K_{22r}(t, 0, \xi) u_t(t, \xi)] d\xi + R_{2r}(t, 0).$$

В итоге для элементов матрицы $K(t, r, \xi)$ получена нелинейная система интегро-дифференциальных уравнений со специальными начально-граничными условиями:

$$\left\{ \begin{array}{l} K_{11t}(t, r, \xi) + 2a^2 K_{12rr}(t, r, \xi) - \frac{1}{\alpha_2} \int_0^1 K_{12}(t, r, \zeta) K_{12}(t, \xi, \zeta) d\zeta - \\ - \frac{1}{\beta_2} K_{12}(t, 1, r) K_{12}(t, \xi, 1) - \frac{a^4}{\beta_1} K_{12r}(t, 0, \xi) K_{12r}(t, r, 0) + \alpha_0 \delta(\xi - r) = 0 \\ K_{12t}(t, r, \xi) + K_{11}(t, r, \xi) + 2a^2 K_{22rr}(t, r, \xi) - \frac{1}{\alpha_2} \int_0^1 K_{12}(t, r, \zeta) K_{22}(t, \xi, \zeta) d\zeta - \\ - \frac{1}{\beta_2} K_{12}(t, 1, r) K_{22}(t, \xi, 1) - \frac{a^4}{\beta_1} K_{12r}(t, 0, r) K_{22r}(t, \xi, 0) = 0 \quad (15) \\ K_{22t}(t, r, \xi) + K_{12}(t, r, \xi) - \frac{1}{\alpha_2} \int_0^1 K_{22}(t, r, \zeta) K_{22}(t, \xi, \zeta) d\zeta + \beta_0 \delta(r - 1, \xi - 1) - \\ - \frac{1}{\beta_2} K_{22}(t, 1, r) K_{22}(t, \xi, 1) - \frac{a^4}{\beta_1} K_{22r}(t, 0, r) K_{22r}(t, \xi, 0) + \alpha_1 \delta(\xi - r) = 0 \end{array} \right.$$

Для определения компонентов вектор-функции $R(t, r)$ получили систему линейных интегро-дифференциальных уравнений в частных производных:

$$\left\{ \begin{array}{l} R_{1t}(t, r) + a^2 R_{2rr}(t, r) - \frac{1}{\alpha_2} \int_0^1 K_{12}(t, r, \xi) R_2(t, \xi) d\xi - \frac{1}{\beta_2} K_{12}(t, 1, r) R_2(t, 1) - \\ - \frac{a^2}{\beta_1} K_{12r}(t, 0, r) R_{2r}(t, 1) + 2\alpha_0 \varphi(t, r) = 0 \quad (16) \\ R_{2t}(t, r) + R_1(t, r) - \frac{1}{\alpha_2} \int_0^1 K_{22}(t, r, \xi) R_2(t, \xi) d\xi - \frac{1}{\beta_2} K_{22}(t, 1, r) R_2(t, 1) - \\ - \frac{a^2}{\beta_1} K_{22r}(t, 0, r) R_{2r}(t, 0) + 2\alpha_1 \psi(t, r) = 0 \end{array} \right.$$

Функция $\eta(t)$ определяется явно с помощью функции $R_2(t, r)$:

$$\eta'(t) - \frac{1}{4\alpha_2} \int_0^1 R_2^2(t, r) dr - \frac{1}{4\beta_2} R_2^2(t, 1) - \frac{1}{4\beta_1} R_{2r}^2(t, 0) + \int_0^1 [\alpha_0 \varphi^2(t, r) + \alpha_1 \psi^2(t, r)] dr = 0; \quad (17)$$

начальные условия: $K(\tau, r, \xi) = R(\tau, r) = \eta(\tau) = 0$; граничные условия: $K_{12}(t, 0, \xi) = K_{22}(t, 0, \xi) = R_2(t, 0) = 0$, $K_{12r}(t, 1, \xi) = K_{22r}(t, 1, \xi) = R_{2r}(t, 1) = 0$.

Поставленная в начале задача (1) – (7) решена полностью; решение определено с помощью найденной матрицы $K(t, r, \xi)$, функции $R(t, r)$ и $\eta(t)$.

Найдены функциональные производные $v_1(t, r)$, $v_2(t, r)$; подставляя значение $v_2(t, r)$ в (14), найдем оптимальные управляющие функции:

$$\begin{cases} p(t, r) = -\left(\frac{1}{2\alpha_2}\right) \left\{ \int_0^1 2[K_{12}(t, r, \xi)u(t, \xi) + K_{22}(t, r, \xi)u_t(t, \xi)] d\xi + R_2(t, r) \right\} \\ \mu(t) = -\left(\frac{1}{2\beta_2}\right) \left\{ \int_0^1 2[K_{12}(t, 1, \xi)u(t, \xi) + K_{22}(t, 1, \xi)u_t(t, \xi)] d\xi + R_2(t, 1) \right\} \\ v(t) = -\left(\frac{a^2}{2\beta_1}\right) \left\{ \int_0^1 2[K_{12r}(t, 0, \xi)u(t, \xi) + K_{22r}(t, 0, \xi)u_t(t, \xi)] d\xi + R_{2r}(t, 0) \right\} \end{cases} \quad (18)$$

В формулах (18) функции $v(t)$, $\mu(t) \equiv \mu(t, x(t), x'(t))$, $p(t, r) \equiv p(t, r, x(t), x'(t))$ зависят от найденных из задачи (4), (5) оптимальных функций $x(t), x'(t)$. Функции $u(t, r), u_t(t, r)$ ($0 < t < \tau$) определяются из начально-краевой задачи для интегро-дифференциальных уравнений в частных производных при подстановке значений найденных управлений из (18) в (1) – (3).

Из формулы (18) определены структуры оптимальных управляющих функций $v(t)$, $\mu(t, x(t), x'(t))$, $p(t, r, x(t), x'(t))$, т. е. законы граничных и внешних сил, действующих на ствол орудия.

Обоснованию методов динамического программирования и спектрального разложения посвящена монография [5]. Для практической реализации решения задачи (1) – (7) удобно использовать корневые функции следующей спектральной задачи ($X_n(r) = \sqrt{2} \sin \lambda_n r$, $\lambda_n = \frac{\pi}{2}(2n - 1)$; $n = 1, 2, \dots$):

$$X''(r) + \lambda^2 X(r) = 0; X(0) = X'(1) = 0, r \in [0, 1].$$

Замечание

Задача (1) – (7) может быть обобщена, в частности, можно рассматривать крутильно-продольные колебания трубки. Также можно считать, что координаты точки попадания могут быть подвижными. Предлагаемые здесь методы решения задачи оптимального конструирования можно применять и в этих задачах.

Результаты, полученные в настоящей работе, рекомендуется использовать в технических задачах, в которых ищется оптимальная траектория материальной точки, в частности, эти результаты могут быть применены в военно-промышленном комплексе.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Рахимов, М., Об одной модельной задаче оптимального конструирования / М. Рахимов // Наука и инновационные технологии в эпоху Великого возрождения: Международная конференция Aşgabat, Ylum, 10–12 июня 2011. – Ашхабад, 2011.
2. Тихонов, А. Н. Уравнения математической физики / А. Н. Тихонов, А. А. Самарский – Москва: «Наука», 1966. – 736 с.
3. Афанасьев, В. Н. Математическая теория конструирования систем управления / В. Н. Афанасьев, В. Б. Колмановский, В. Р. Носов. – Москва: «Высшая школа», 1989. – 447 с.
4. Математическая теория оптимальных процессов / Л. С. Понтрягин [и др.]. – М.: Наука, 1983.

5. Рахимов М., Оптимальное моделирование процессов теплопередачи и колебаний. Методы динамического программирования и спектрального разложения: научная монография, LAP: LAMBERT Academic Publishing. – 356 с.

УДК 621.9-05

МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ ШУМОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ СТАНКОВ

Сергуцкий Д. С., Григорьев В. Ф.

*Брестский государственный технический университет,
Брест, Республика Беларусь*

Введение

Шумовые характеристики металлорежущих станков определяют, с одной стороны, экологическую обстановку в производственном помещении, с другой стороны – состояние и качество изготовления деталей и узлов станка [3]. Изучение и разработка систем контроля технического состояния металлорежущих станков по параметрам шумовых характеристик является важной и актуальной задачей. Такие системы позволяют производить оценку состояния оборудования, как при приемо-сдаточных испытаниях, так и при периодических, существует возможность их применения на этапах проработки конструкции нового образца оборудования. Актуальным является использование данных систем в процедурах эффективного контроля фактического состояния оборудования, находящегося в режиме нормальной промышленной эксплуатации, особенно целесообразно их использование для контроля фактического состояния сложного оборудования, работающего в автоматическом режиме длительное время без непосредственного присутствия наладчика или оператора (круглосуточный режим, многостаночное обслуживание).

Цель работы

Выбор метода контроля шумовых характеристик металлорежущих станков в условиях работающего цеха.

Методы оценки шумовых характеристик

Шумовые характеристики наиболее чувствительны к отклонению параметров работы станка от нормативных значений. Контроль шумовых характеристик не предусматривает дорогостоящие работы по демонтажу и разборке оборудования, которые также нарушают процесс приработки деталей. Данный вид контроля может производиться без отрыва оборудования от производства.

Существует несколько вариантов оценки технического состояния станка по шумовым характеристикам. Один из них основан на сопоставлении фактических шумовых характеристик конкретного экземпляра определенной модели станка, со среднестатистическими эталонными показателями для данной модели. Данный метод применим к моделям станков, выпускаемым в большом количестве.

Существует также другой метод, основанный на сопоставлении фактических шумовых характеристик станка с допустимыми шумовыми характеристиками в соответствии с ГОСТ 12.2.107-85. В данном ГОСТе указаны допустимые

значения шумовых характеристик для станков суммарной эквивалентной мощностью электродвигателей от 2 до 64 кВт, также в нем указаны типовые условия эксплуатации (режимы и условия работы под нагрузкой) при измерении шумовых характеристик для токарных, фрезерных, сверлильных, расточных, строгальных, долбежных, шлифовальных и зубообрабатывающих станков, как с ручным управлением, так и с ЧПУ.

Таблица – Допустимые значения октавных и скорректированных уровней звуковой мощности при работе станков на холостом ходу и под нагрузкой [1]

Суммарная номинальная мощность электродвигателей приводов, кВт				Уровень звуковой мощности L_p , дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц						Корректированный уровень звуковой мощности L_{PA} , дБА		
				63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Св.	2	До	2	82	82	82	82	79	77	75	73	84
		до	4	89	89	89	89	86	84	82	80	91
	4	"	12,5	95	95	95	95	92	90	88	86	97
		"	32	100	100	100	100	97	95	93	91	102
	12,5	"	64	108	108	108	105	102	100	98	96	107
		"	64	111	111	111	108	105	103	101	99	110

Для того чтобы получить фактические значения шумовых характеристик, необходимо провести испытание станка в соответствии с ГОСТ 12.1.028—80, который регламентирует определение шумовых характеристик источника шума. В данном ГОСТе указана необходимая аппаратура и методика проведения испытаний.

Средства измерения шума

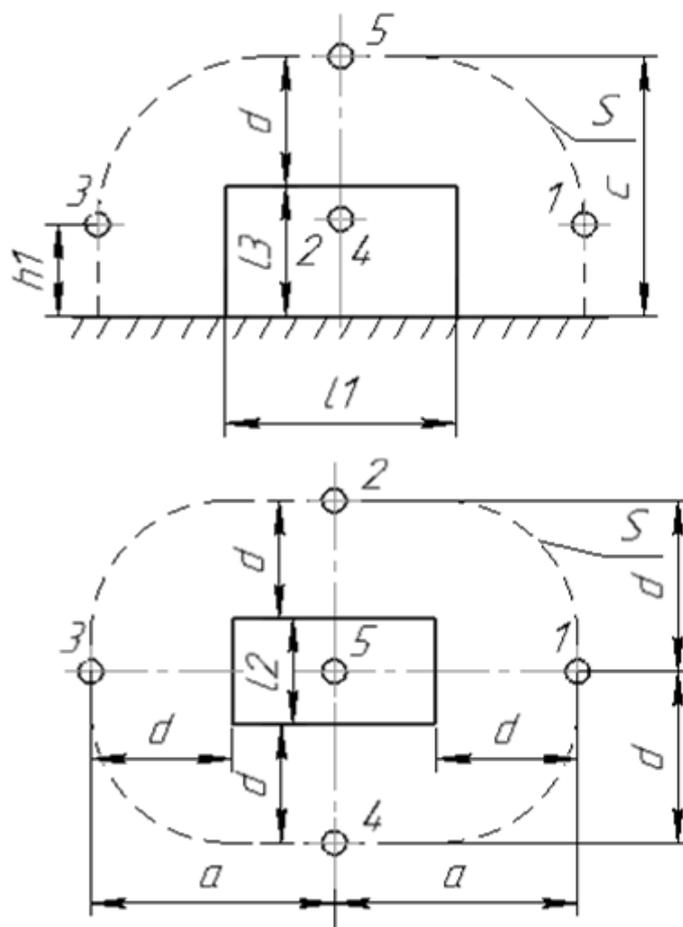
В качестве приборов для измерения уровней звукового давления и уровней звука применяют шумомеры 1-го или 2-го класса по ГОСТ 17187-81 с полосовыми электрическими фильтрами по ГОСТ 17168-82 или измерительными трактами с характеристиками, соответствующими этим стандартам. Микрофон шумомера должен быть предназначен для измерений в отраженном звуковом поле, так как испытания станков проводятся в помещениях. Перед и после проведения измерения необходимо проводить акустическую и электрическую калибровку шумомера. Погрешность применяемого для акустической калибровки источника звука не должна превышать $\pm 0,5$ дБ.

В соответствии с ГОСТ 17187-81 и ГОСТ 17168-82 шумомер для проведения измерений шумовых характеристик станка должен иметь следующие характеристики: показания выражаются в децибелах относительно опорного звукового давления 20 мкПа, частотный диапазон измерений в пределах от 20 до 8000 Гц, соответствующая частотная характеристика.

Этим требованиям соответствуют доступные отечественные и зарубежные приборы, такие как шумомер-анализатор спектра ОКТАВА-111, шумомер-виброметр анализатор спектра ЭКОФИЗИКА-110А, шумомер Testo 816-2 и другие. Перспективным является использование в качестве приборов для измерения и анализа шума мобильных устройств связи. Мобильные устройства связи непрерывно совершенствуются, расширяются их возможности, ведется разработка приложений, в том числе для спектрального анализа шума [4].

Методика измерения параметров шума

В соответствии с ГОСТ 12.1.028—80 испытываемый источник шума следует установить в середине испытательной площадки, на звукоотражающей плоскости. Точки измерений следует располагать на измерительной поверхности. Измерительная поверхность – условная поверхность, которая окружает источник шума и заканчивается на звукоотражающей плоскости.



S – измерительная поверхность; 1–5 – точки измерения;
l1, l2, l3 – размеры огибающего источник шума параллелепипеда;
d – измерительное расстояние;
a, b, c – характеристические размеры измерительной поверхности [2]
Рисунок – Схема проведения измерения параметров шума

В качестве измерительной поверхности следует принимать полусферу или измерительную поверхность, которая расположена на одном и том же измерительном расстоянии d от огибающего испытываемый источник шума параллелепипеда (см. рисунок). Параллелепипед, огибающий источник шума, – условная поверхность, также окружающая источник шума и заканчивающаяся на звукоотражающей плоскости. Размеры параллелепипеда должны соответствовать габаритным размерам источника шума. При определении их не следует учитывать части источника, которые существенно не излучают звуковой энергии (рычаги, концы валов и т. п.), но следует учитывать траектории, описываемые движущимися при работе частями источника шума.

Измерительное расстояние следует выбирать таким образом, чтобы точки измерения лежали вне зоны ближнего поля источника шума и в пределах окружающего источника шума пространства. Измерительное расстояние должно быть равно 1 м ($d = 1$ м); допускается меньшее измерительное расстояние, но не менее 0,25 м.

При измерениях на площадках больших размеров, а также при испытаниях источников шума, которые не допускают приближения микрофона менее чем на 1 м, измерительное расстояние может быть более 1 м ($d > 1$ м).

Полусферическая измерительная поверхность должна использоваться, если измерительное расстояние d превышает в 1,5 раза максимальный размер огибающего параллелепипеда, а радиус R измерительной полусферы больше или равен удвоенному максимальному размеру огибающего параллелепипеда. Центр измерительной полусферы должен совпадать с проекцией центра огибающего параллелепипеда на звукоотражающую плоскость. Площадь измерительной полусферы вычисляют по формуле

$$S = 2\pi R^2. \quad (1)$$

Характеристические размеры измерительной поверхности, расположенной на расстоянии d от огибающего источник шума параллелепипеда (см. рисунок), вычисляют по формулам:

$$a = 0.5l_1 + d, b = 0.5l_2 + d, c = l_3 + d, \quad (2)$$

где l_1, l_2 – размеры основания параллелепипеда, огибающего источник шума, м;

l_3 – высота параллелепипеда, огибающего источник шума, м;

d – измерительное расстояние, м.

Площадь измерительной поверхности следует определять по формуле:

$$S = (a \cdot b + a \cdot c + b \cdot c) \cdot \frac{(a+b+c)}{(a+b+c+2 \cdot d)} \quad (3)$$

Количество точек измерения должно быть не менее пяти. Располагать их следует, как указано на Рисунке.

Точки измерения 1–4 расположены на высоте h_1 , которая должна быть не менее 0,15 м. Высоту h_1 вычисляют по формуле

$$h_1 = 0.25 \cdot (b + c - d). \quad (4)$$

Если разность между максимальными и минимальными уровнями звука в точках измерений 1–5 превышает 8 дБА, то следует использовать 8 точек измерения.

Если расположение микрофона в измерительной точке затруднено, то две измерительные точки могут быть смещены в сторону при условии сохранения равномерного распределения остальных точек на измерительной поверхности.

Для проведения измерений микрофон должен быть установлен в точке измерения и ориентирован в направлении испытываемого источника шума. Между микрофоном и источником шума не должны находиться люди или предметы, искажающие звуковое поле. Расстояние между микрофоном и наблюдателем должно быть не менее 0,5 м.

На шумомере должна быть установлена временная характеристика S (медленно).

Если показания шумомера колеблются в пределах 5 дБ, то следует отсчитывать среднее значение уровней.

Результаты измерений оформляются в виде протокола ГОСТ 12.2.107-85 [2].

Вывод

В качестве метода контроля шумовых характеристик в условиях работающего цеха следует использовать метод сопоставления фактических шумовых характеристик станка, с допустимыми шумовыми характеристиками по ГОСТ 12.2.107-85.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Шум. Станки металлорежущие. Допустимые шумовые характеристики: ГОСТ 12.2.107-85. М. : Издательство стандартов, 2008. – 12 с.

2. Шум. Определение шумовых характеристик источников шума. ГОСТ 12.1.028-80. М. : Издательство стандартов, 1989. – 10 с.

3. Машиностроение. Энциклопедия. Ред. совет: Фролов К.В. (пред.) и др. М.: Машиностроение. Металлорежущие станки и деревообрабатывающее оборудование. Т. 4–7 / Б.И. Черпаков, О.И. Аверьянов, Г.А. Адонян и др. Под ред. Б.И. Черпакова. – 2-е изд., испр. 2002. – 864 с., ил.

4. 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.

УДК 621.926

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ УДАРНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ВЫХОДНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ПРОЦЕССА ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ В ВИБРОВАЛКОВОМ ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЕ

Сотник Л. Л., Дремук В. А.

*Барановичский государственный университет
Барановичи, Республика Беларусь*

Введение

На современном этапе становления мировой промышленности невозможно представить отрасль, где бы не встречались процессы дезинтеграции. Немаловажной задачей в сложившейся экономической ситуации является создание нового и модернизация имеющегося на предприятиях оборудования.

На сегодняшний день среди всего многообразия известных различных способов дезинтегративной переработки различного минерального сырья в дисперсное состояние наиболее распространенным и простым остается механическое измельчение. Большое распространение получили агрегаты с преобладающим ударным действием, как наиболее эффективным способом разрушения твердых материалов. При динамическом нагружении материалов возникающие в нем напряжения вдвое больше, чем при статическом.

Преимущество ударного воздействия по сравнению с раздавливающим основано на том, что при ударе сила сжатия возникает в определенном сечении так быстро, что трещина образуется до того, как в частице материала устанавливается равновесное распределение энергии, результатом чего является уменьшение количества энергии, необходимое для осуществления разрыва.

Согласно предлагаемым теориям эффективность измельчения зависит от продолжительности приложения внешней силы и температуры тела.

Измельчение большинства многокомпонентных структурно-неоднородных материалов с помощью удара позволяет получать продукт помола высокого качества, затрачивая при этом минимальное количество энергии.

В отечественной практике об эффективности применения ударного способа измельчения говорят работы таких исследователей, как Э. И. Левданский [1], Л. А. Сиваченко [2], П. Е. Вайтехович [3], и многих других.

Таким образом, оценка влияния ударного воздействия на выходные параметры процесса измельчения в вибровалковом измельчителе является актуальной задачей.

Основная часть

Одной из важнейших характеристик, определяющих эффективность работы вибровалкового измельчителя, является сила воздействия валков на измельчаемый материал. Необходимая для измельчения сила влияет на энергозатраты процесса измельчения и зависит от многих параметров [4].

Для того чтобы разрушить тело, его необходимо деформировать на такую величину, при которой в материале возникнет разрушающее напряжение. В вибровалковом измельчителе на материал передается раздавливающе-сдвиговые и ударные воздействия.

Упрощенная модель поступательных колебаний эксцентрика, создающих ударное воздействие, показана на рисунке 1.

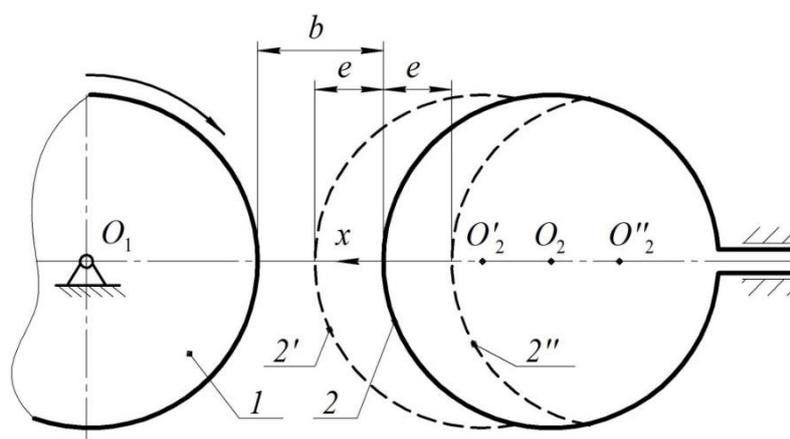


Рисунок 1 — Упрощенная модель колебаний эксцентрика

В процессе колебаний валок из положения 2 перемещается на расстояние e (эксцентриситет) в крайнее левое положение 2', затем в крайнее правое 2''. Перемещение эксцентрика из положения 2'' в 2', в ходе которого материал сжимается и разрушается, представляет собой его рабочий ход. Обратное перемещение валка из положения 2' в 2'' назовем холостым ходом. Заметим, что во

время холостого хода силовое напряжение слоев уменьшается. В верхней части активного пространства оно может изменяться до нулевого значения с потерей контакта между валком и материалом. Восстанавливаться контакт будет при рабочем ходе с эффектом удара [4].

Разработанная методика силового анализа в вибровалковом измельчителе практически может использоваться с различной эффективностью в зависимости от механических и структурных характеристик измельчаемого материала, а также от геометрических e – величина эксцентриситета, b – ширина межвалкового пространства, R – радиус валков, кинематических параметров ω – угловая скорость вращения и других факторов.

Согласно проведенным исследованиям график зависимости изменения контактного напряжения при продвижении материала через рабочее пространство (рисунок 2) имеет волнообразный вид, где каждая волна – это удар валка по материалу. Нарастание усилия зависит от выбора конструктивных и технологических параметров вибровалкового измельчителя, в частности, величины эксцентриситета и частоты вращения эксцентрикового валка.

Согласно проведенному теоретическому анализу можно сказать, что с каждым силовым импульсом эксцентрикового валка происходит значительное увеличение суммарного усилия. В ходе такого воздействия на материал внутри его частиц образуется система микротрещин, которые ослабляют материал, способствуя его дроблению и последующему измельчению.

Таким образом, совмещение ударного и раздавливающе-сдвигового деформирования позволяет изменить силовое воздействие на материал, а образовавшаяся система микротрещин приводит к высвобождению минералов и раскрытию сростков — селективному разрушению с минимальными затратами.

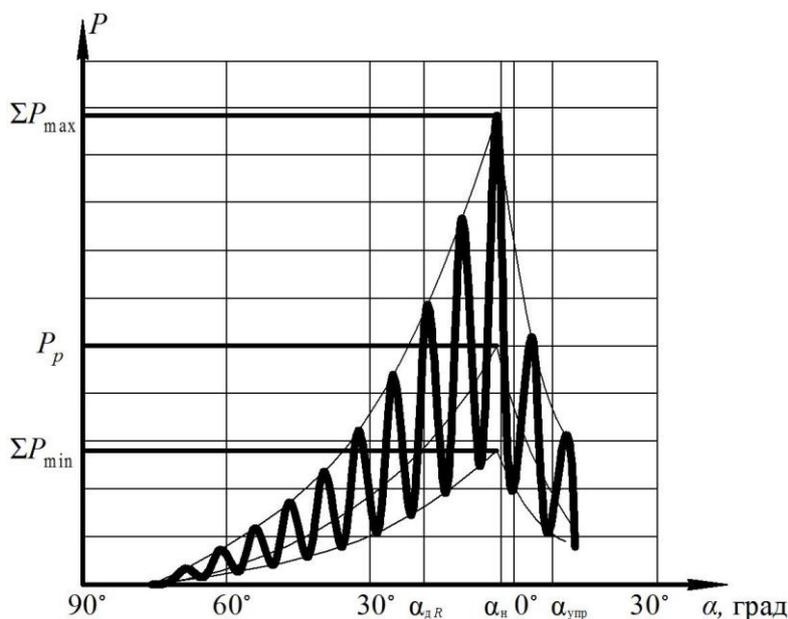


Рисунок 2 – Изменение суммарного усилия на материал

Экспериментальные исследования ударного воздействия в вибровалковом измельчителе. Ранее проведенные теоретические и поисковые исследования [4]

позволили установить, что на величину выходных параметров процесса измельчения материалов с различными физико-механическими характеристиками и структурой существенное влияние оказывает частота вращения эксцентрикового вала, создающая ударное воздействие на материал.

С целью изучения влияния ударного воздействия на выходные показатели и определения оптимального их значения проведены исследования и изучены зависимости степени измельчения i и удельной энергоёмкости q (рисунок 3) при измельчении сильвинита.

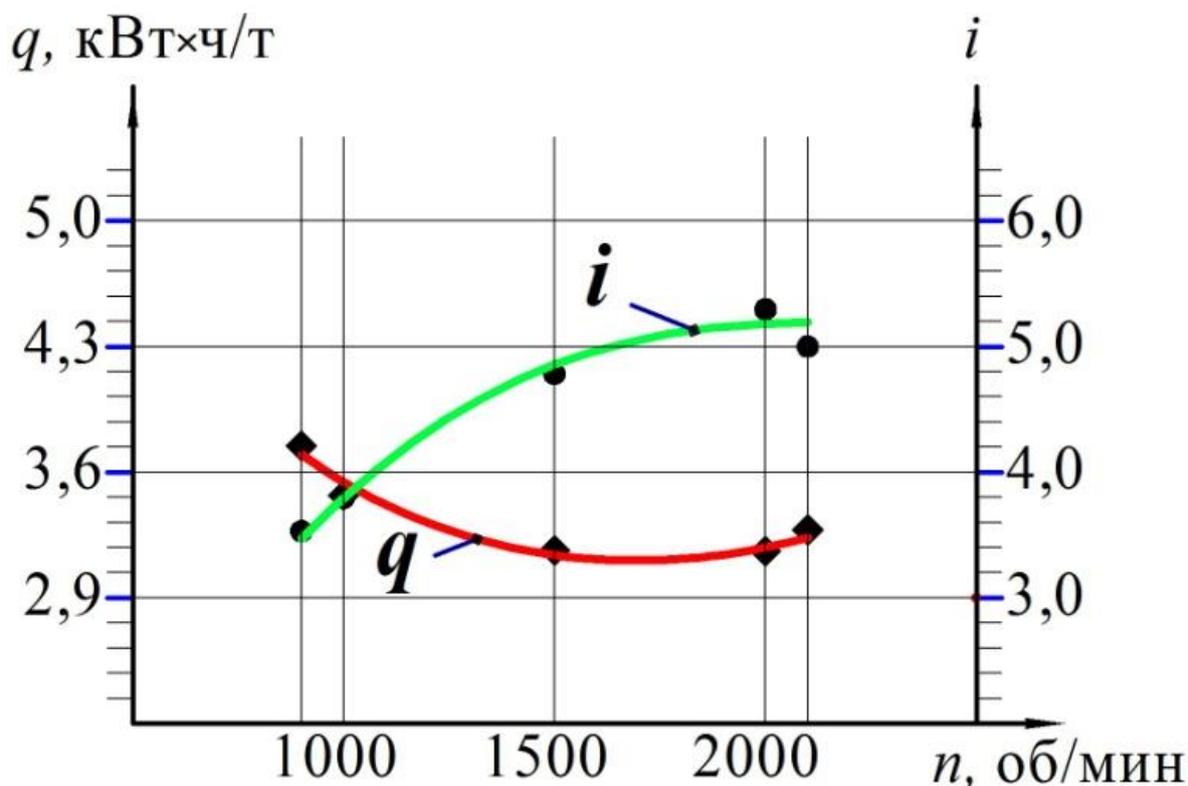


Рисунок 3 — Влияние частоты ударного воздействия на степень измельчения и удельную энергоёмкость

Как видно из графической зависимости (рисунок 3), варьирование частотой вращения эксцентрикового вала n меняет качественные и количественные параметры процесса измельчения.

Так, при увеличении n с нижнего ($n = 1000$ об / мин) уровня варьирования до верхнего ($n = 2000$ об / мин) происходит изменение качественных и количественных параметров процесса [5].

Так степень измельчения материалов возрастает с $i = 3,85$ до $i = 5,26$ на 37 %.

Создание ударного воздействия приводит к уменьшению удельного расхода электроэнергии, затрачиваемой на осуществление процесса измельчения, с $q = 3,544$ кВт · ч / т до $q = 3,179$ кВт · ч / т на 10,3 %.

Также не менее значимой характеристикой измельчения материала является величина тонкости помола, характеризуемая остатком на сите с соответствующей ячейкой (рисунок 4).

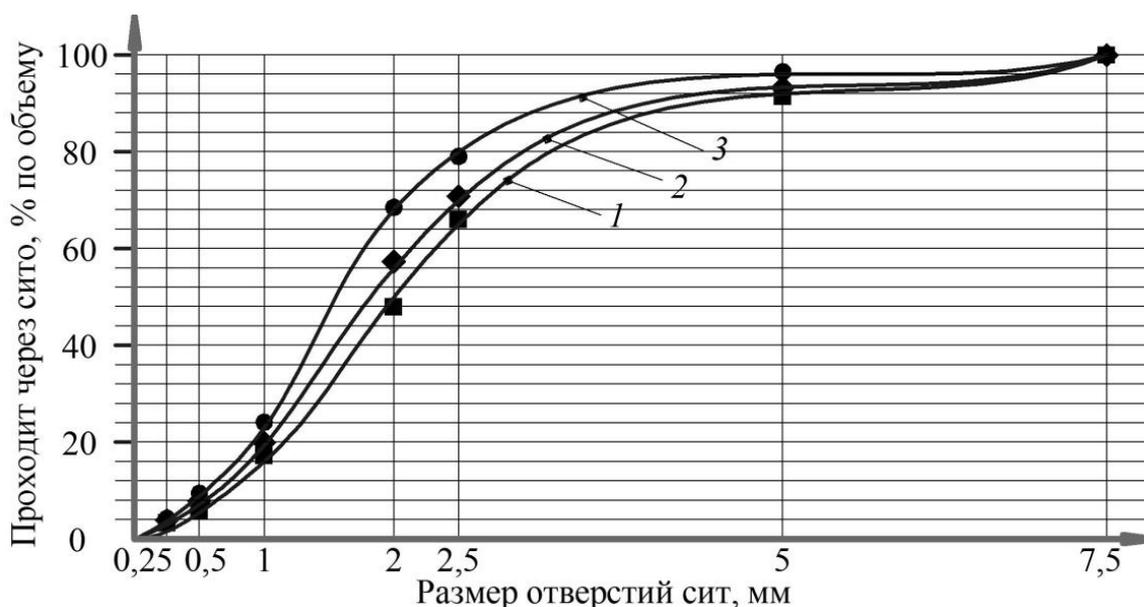


Рисунок 4 – Влияние частоты вращения эксцентрикового вала n на качественный показатель процесса R (1 – $n = 1000$ об / мин, 2 – $n = 1500$ об / мин, 3 – $n = 2000$ об / мин)

При измельчении сильвинита важным параметром тонкости помола является переизмельчение материала [1]. Таким образом, важным выходным качественным параметром оценки влияния частоты вращения эксцентрикового вала n будет остаток на ситах $R_{2,5}$; R_1 ; $R_{0,5}$ и $R_{0,25}$.

Так, при увеличении n с нижнего ($n = 1000$ об / мин) уровня варьирования до верхнего ($n = 2000$ об / мин) остаток на ситах меняется следующим образом (рисунок 4):

- $R_{2,5}$ с 38 % до 20 % уменьшение на 47 %;
- R_1 с 83 % до 78 % уменьшение на 6,0 %;
- $R_{0,5}$ с 97 % до 95 % уменьшение на 2,0 %.

Заключение

Таким образом, изменение частоты вращения эксцентрикового вала n позволяет создать более интенсивное ударное воздействие на измельчаемый материал, что приводит к уменьшению удельного расхода электроэнергии, затрачиваемой на осуществление процесса измельчения и увеличению тонкости помола.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Левданский, Э. И. Совершенствование процесса измельчения сильвинитовой руды перед флотацией / Э.И. Левданский, И.А. Левданский // Труды БГТУ. – 2015. – № 3 (176). – С. 152–158.
2. Сиваченко, Л. А. Решение проблем измельчения и дезинтеграторных технологий / Л. А. Сиваченко // Строительные и дорожные машины. – 2005. – № 11. – С. 31–34.
3. Определение основных параметров ударного взаимодействия абразивных частиц с лопастями ротора-ускорителя центробежной мельницы / П. Е. Войтехович [и др.] // Горная механика и машиностроение. – 2017. – № 2. – С. 76–95.

4. Сотник, Л. Л. Метод приближенного анализа взаимодействия материала с валками в вибровалковом измельчителе / Л. Л. Сотник, С. И. Русан, Л. А. Сиваченко, О. И. Наливко // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2020. – № 4. – С. 453–463.

5. Сотник, Л. Л. Сравнительный анализ процесса дробления сильвинитовой руды в вибровалковом измельчителе на различных режимах / Л. Л. Сотник [и др.] // Труды БГТУ. Сер. 2 : Химические технологии, биотехнология, геоэкология. – Минск : БГТУ, 2020. — № 2. — С. 76—81.

ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ

РАСЧЕТ РЕБРИСТО-КОЛЬЦЕВОГО КУПОЛА ИЗ ЛЕГКИХ СТАЛЬНЫХ ТОНКОСТЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Бочарова Н. В., Самута М. В.

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

Конструкции, выполненные из легких стальных тонкостенных профилей, получили широкое применение в несущих элементах зданий и сооружений различного назначения, так как их использование позволяет значительно уменьшить расход стали в сравнении со стандартными решениями. Инженерный расчет будет основываться на точном подходе – объемном моделировании конструкции купола. Ребристо-кольцевые купола образуются системой меридиональных и кольцевых ребер.

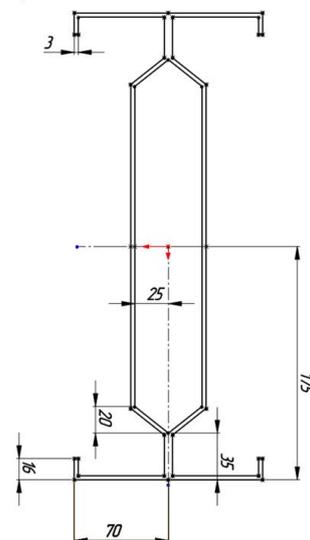
Объектом исследования является ребристо-кольцевой купол, размерами ($R = 6,07\text{м}$; $r = 0,5\text{м}$), с заданными конструктивными особенностями (рисунок 1), которые используется в современном строительстве в основном для перекрытия больших пролетов с целью уменьшения расхода применяемых материалов.

Цель работы – изучение современных и технологичных методов проектирования конструкций, оценка несущей способности конструкции (ребристо-кольцевого купола) в целом и ее элементов, используя системы инженерного анализа и компьютерное моделирование.

а)



б)



*а – твердотельная параметрическая модель купола,
б – эскиз поперечного сечения профиля несущего ребра*
Рисунок 1 – Ребристо-кольцевой купол

Моделируя конструкцию как твердое тело, можно более точно получить результат поведения сооружения под заданными нагрузками и выявить опасные места пространственной стержневой системы, где прогнозируется разрушение

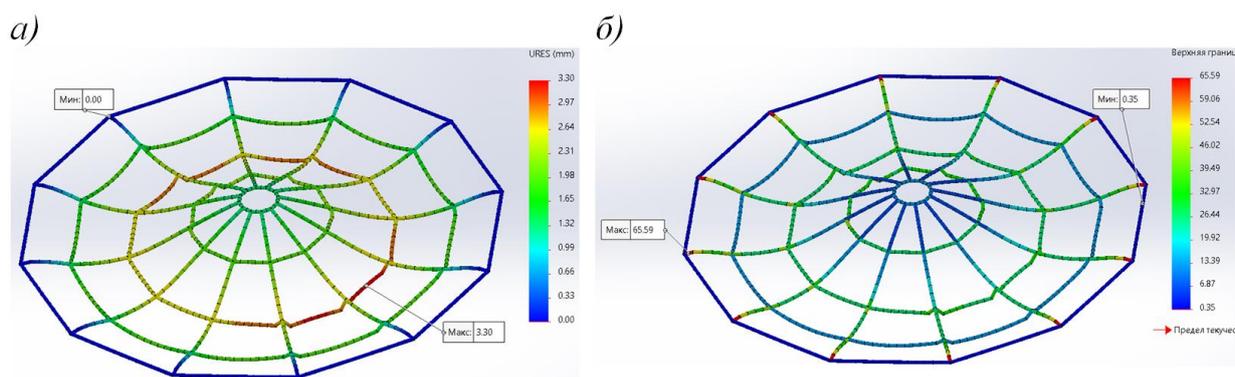
конструкции по материалу. Создание стержневой системы начинали с создания эскиза профилей для элементов конструкции. Сечение лучей выполняем из двух спаренных профилей, характеристики сечения взяты с сортамента тонкостенных элементов [1], эскиз профиля представлен на рисунке 1б. Между несущими ребрами есть промежуточные элементы, выполненные из одиночных профилей 140x3.2 мм. Опорное кольцо выполнено из труб прямоугольного сечения 160x80x5 мм ГОСТ 30245-2003, данное кольцо воспринимает максимальную нагрузку. Используя инструменты построения эскизов в *SolidWorks*: «3D-эскиз», «12-тиугольник», «автоматическое нанесение размеров», «вспомогательная плоскость», «круговой массив», по нужным размерам выполнили эскизы параметрической модели ребристо-кольцевого купола [2].

Далее с помощью функции «Конструкция» получили твердотельную параметрическую модель купола, которую выполнили с помощью разработанной автором базы стальных тонкостенных холодноформованных профилей типа «Σ» и стандартного прямоугольного профиля.

Для расчета на прочность в *Simulation* необходимо последовательное выполнение основных шагов – алгоритм статического расчета [3]:

- задается материал деталей профиля купола – «оцинкованная сталь»;
- определяются виды и места креплений купола (наложение связей на расчетную схему) – это узловые точки опорного кольца (рисунок 2);
- прикладывается внешняя нагрузка в узлы стержневой системы, которая была собрана по ТКП EN;

– рассчитывается сетка для исследования. Создание сетки зависит от активных параметров формирования сетки, в зависимости от того как твердое тело учитывается в расчете: «Балка» или «Стержень». Для твердотельного моделирования нужно устанавливать определение для элементов – «Балка». Результаты статического расчета представлены на рисунках 2, 3.



а) – эпюра перемещений ($max = 3,3$ мм), б) – эпюра напряжений ($max = 65,69$ МПа)

Рисунок 2 – Результаты расчетного модуля

В результате расчета получаем эпюру коэффициента запаса прочности (FOS), представленную на рисунке 3, по эпюре определили места, где есть запас и слабые места конструкции – нижний опорный узел.

Коэффициент запаса прочности – величина, показывающая способность конструкции выдерживать прикладываемые к ней нагрузки выше расчетных. Нали-

чие запаса прочности обеспечивает дополнительную надежность конструкции, чтобы избежать повреждений и разрушения в случае возможных ошибок проектирования, изготовления или эксплуатации. Строгих методов для выбора допустимых коэффициентов запаса не существует, поскольку коэффициент является мерой незнания всех факторов, влияющих на работу конструкции. Выбор производится на основе опыта эксплуатации аналогичных конструкций. В каждой отрасли промышленности существуют собственные нормативы, определяющие допустимые коэффициенты запаса. Наименьшие коэффициенты используются в аэрокосмической отрасли, в силу жестких требований к весу конструкции. Очень большие запасы (порядка 4...6) используются для грузоподъемного оборудования, в особенности для перевозящего людей (для троса пассажирского лифта коэффициент достигает 10).

Для расчета запаса прочности используется критерий максимального напряжения по Мизесу. Этот критерий точно определяет, что пластичный материал начинает растягиваться, когда эквивалентное напряжение (по Мизесу) достигает предела текучести материала.

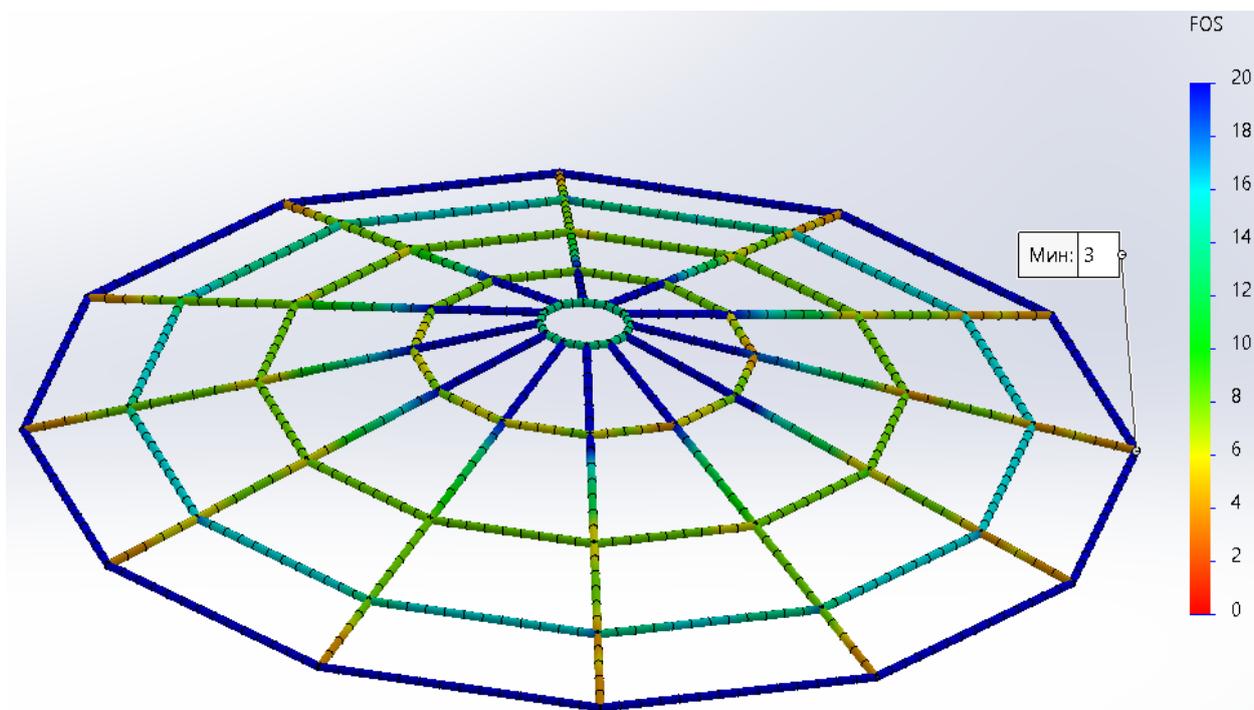
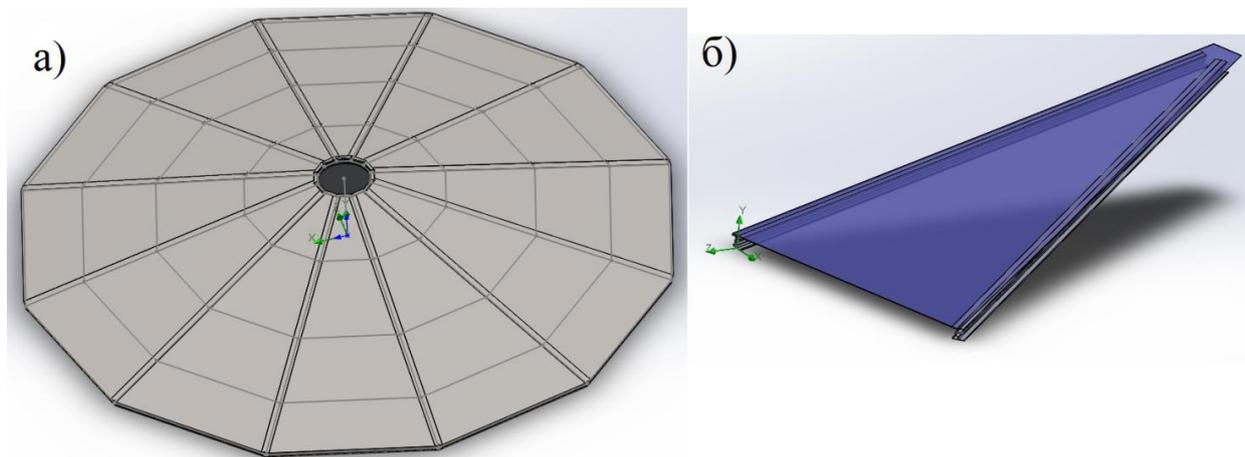


Рисунок 3 – Эпюра запаса прочности ($\max = 3$)

Для задания ветровой нагрузки использовался модуль *FlowSimulation* – это инструмент численного моделирования, основанный на методе конечных объемов. Сеточный алгоритм *FlowSimulation* обладает свойством адаптивности, согласовывая сетку с формой тел, поверхностей раздела, проходных сечений, а также позволяя автоматически перестраивать ее в процессе расчета. Возможности *FlowSimulation*, например, использование рассчитанных усилий и температур в качестве граничных условий в прочностном анализе *Simulation* позволяют более точно задать внешние нагрузки [4]. Для моделирования ветрового воздействия необходимо обшить систему плоским листом (рисунок 4).



а) – весь купол, б) – клинообразный элемент покрытия
Рисунок 4 – Ребристо-кольцевой купол с покрытием

Для расчета на ветровое воздействие стержневой системы в модуле *FlowSimulation* необходимо последовательное выполнение основных шагов:

- выбирается тип задачи для проекта – «Внешняя»;
- задается среда для анализа потока – воздух («Air»);
- начальные условия: скорость ветра (30м/с), давление (101325Па, температура 293,2К);
- устанавливается глобальная цель – «Определить полное максимальное давление».

Решение задачи – определить полное максимальное давление на обшитые грани купола от ветрового воздействия.

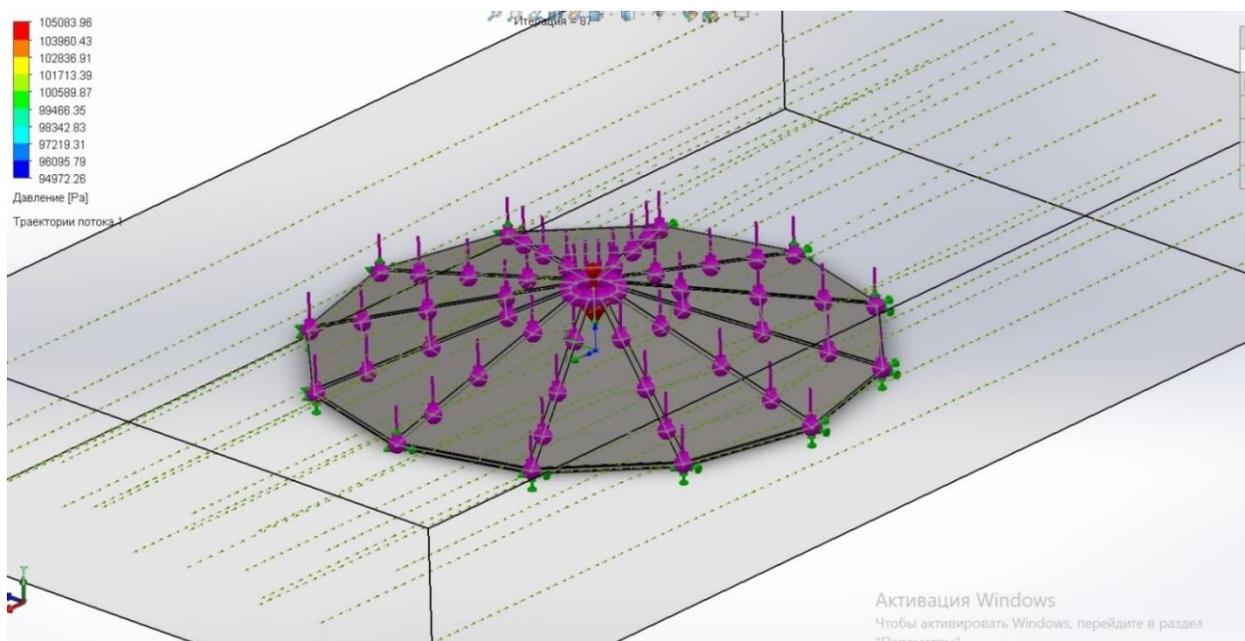


Рисунок 5 – Визуализация ветрового воздействия на купол

Результаты расчета модуля *FlowSimulation* – давление от потока воздуха (рисунок 5, 6), которые для дальнейшего расчета (как внешняя нагрузка) экс-

портируются в среду *Simulation* для определения несущей способности конструкции от ветрового воздействия, что позволяет получить напряженно-деформированное состояние конструкции при действии ветра в любом направлении в автоматическом режиме сразу на всю конструкцию. Эпюра перемещений для клинообразного элемента представлена на рисунке 7.

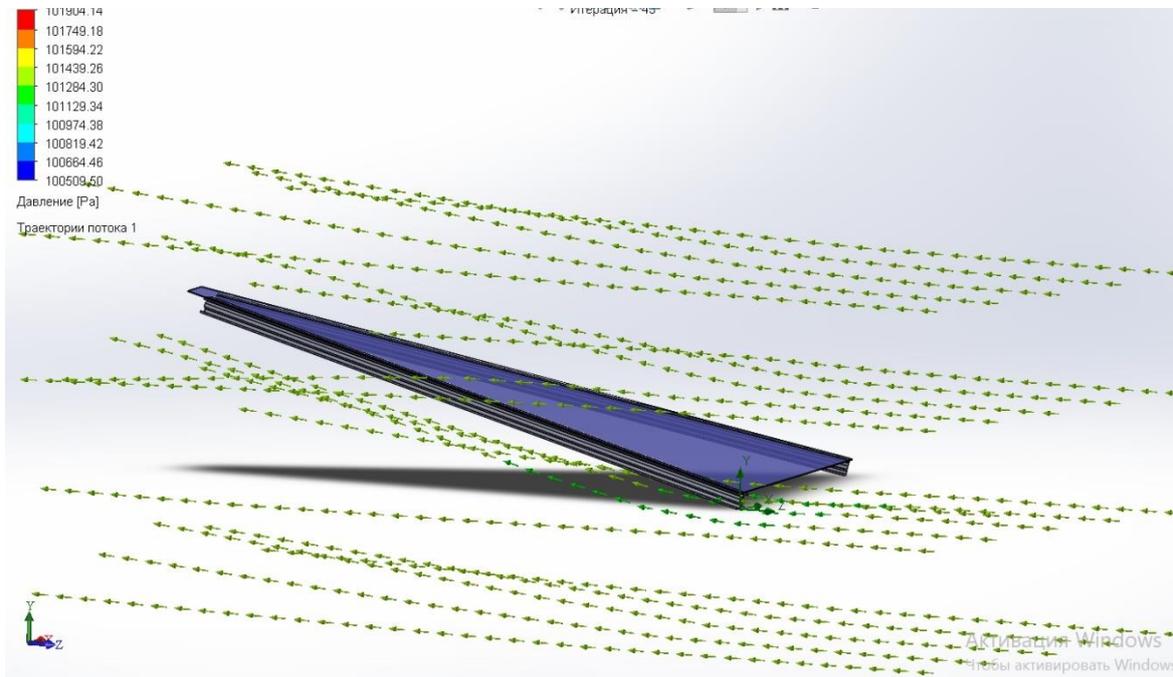


Рисунок 6 – Визуализация ветрового воздействия на элемент

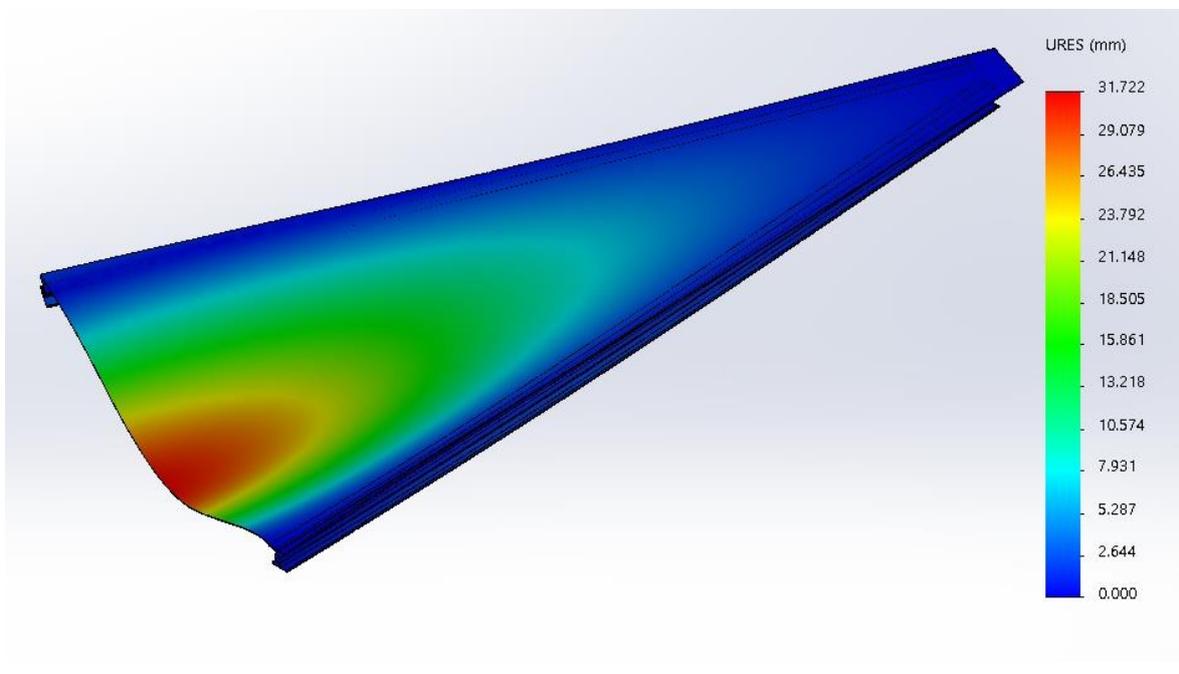


Рисунок 7 – Эпюра перемещений ($\max = 31,722$ мм)

Для инженера нужно получить проектную документацию, которая получается в автоматическом режиме. Параметрическое моделирование конструкций

позволяет подбирать разные варианты конструктивных решений, не затрачивая время на создание чертежей, так как при изменении модели будет меняться и спецификация, и весь чертеж, что существенно экономит время инженера-проектировщика и минимизирует математические ошибки в спецификации. А также при проектировании похожей конструкции необходимо лишь изменить модель и вся проектная документация будет подготовлена в кратчайшие сроки, чертеж и спецификация (рисунок 8).

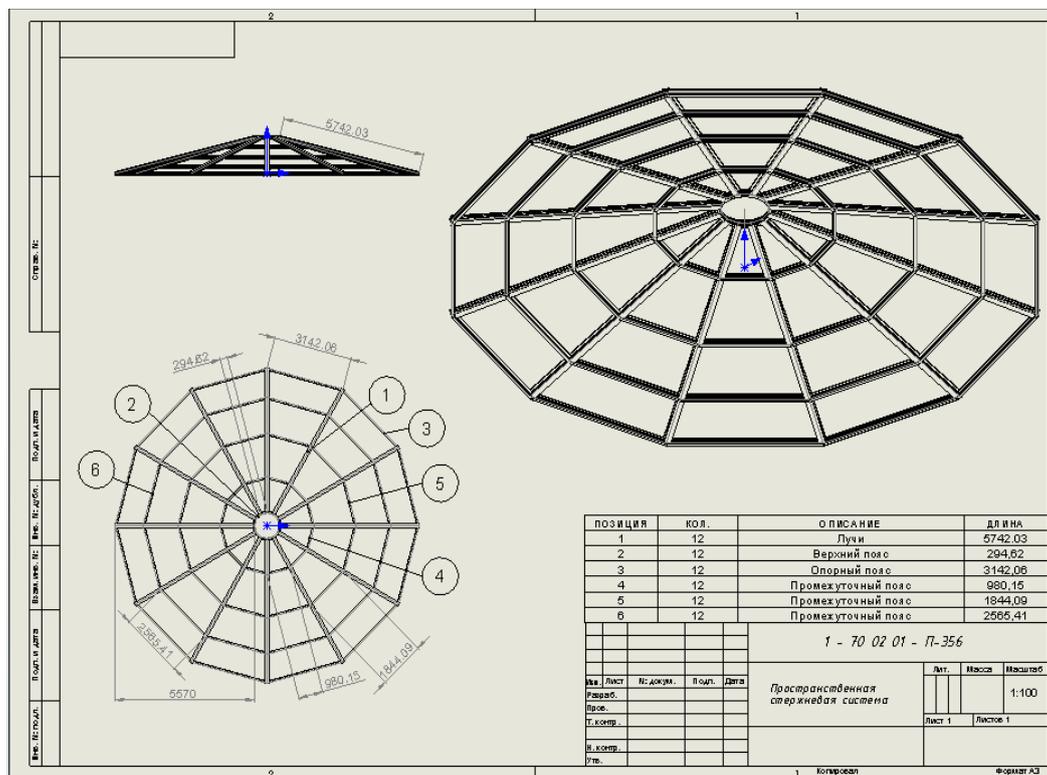


Рисунок 8 – Чертеж и спецификация купола

В ходе проведения данной исследовательской работы выполнена оценка несущей способности пространственной стержневой системы из оцинкованной стали, используя среду *SolidWorks*, реализована методика проектирования в модулях *Simulation*, *FlowSimulation*, Рассчитаны коэффициент запаса прочности, напряжение и перемещение для ребристо-кольцевого купола и клинообразного элемента, получен чертеж и спецификация для купола.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Сортамент холодноформованных профилей для легких стальных тонкостенных конструкций (ЛСТК) производителей Украины. – Киев : Украинский Центр Стального Строительства, 2016. – 31 с.
2. Зиновьев, Д. В. Основы моделирования в *SolidWorks* / Д. В. Зиновьев. – М. : ДМК Пресс, 2017. – 240 с.
3. Лукинских, С. В. Компьютерное моделирование и инженерный анализ в конструкторско-технологической подготовке производства : учебное пособие / С. В. Лукинских ; М-во науки и высш. обр. РФ. – Екатеринбург : Изд-во Урал.ун-та, 2020. — 168 с.

УДК 621.785

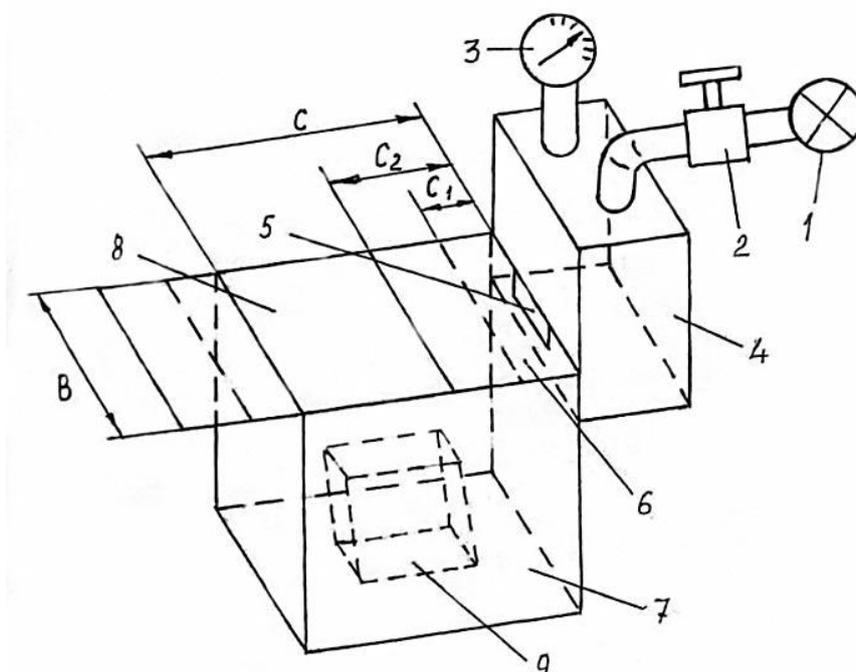
МЕТОДОЛОГИЯ ПОВЫШЕНИЯ РЕСУРСА ИНСТРУМЕНТА ИЗ БЫСТРОРЕЖУЩЕЙ СТАЛИ АЭРОДИНАМИЧЕСКИМ ЗВУКОВЫМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ

Горавский¹ И. А., Жигалов^{1,2} А. Н., Дерман¹ Е. А.

*1) Барановичский государственный университет,
г. Барановичи, Республика Беларусь*

*2) Институт технологии металлов НАН Беларуси,
г. Могилев, Республика Беларусь*

Принципиальные особенности процесса аэродинамического звукового воздействия можно объяснить на следующей схеме установки для аэродинамического звукового воздействия (рисунок 1). Установка является разновидностью объемного резонатора, представляет собой замкнутый прямоугольный контур, где параллельные более длинные стороны выполнены из металлических листов, способных по своим параметрам осуществлять колебательные движения, в отличие от боковых сторон, выполненных более жесткими.



1 – источник генерации воздуха, 2 – регулирующий вентиль, 3 – манометр,

4 – камера сглаживания пульсации воздуха, 5 – целевое сопло,

6 – выходной канал, 7 – резонансная камера,

8 – регулирующая заслонка, 9 – упрочняемые изделия [1]

Рисунок 1 – Схема установки для аэродинамического звукового воздействия

В таком контуре возникают собственные синусоидальные волновые акустические колебания. Возбуждающиеся акустические волны внутри контура, распространяющиеся между колеблющимися стенками, через определенный частотный интервал образуют резонансные пики [1]. Установка выполняется в виде замкнутого прямоугольного контура с линейными размерами между колеблющимися стенками. Причем параллельные более длинные стороны прямоугольника изготавливаются из металлических листов, способных по своим параметрам осуществлять колебательные движения, в отличие от боковых сторон и нижнего основания, неподверженных колебаниям. Возбуждающиеся акустические волны внутри контура устройства, распространяющиеся между колеблющимися стенками, образуют резонансные амплитудные пики.

Установка работает следующим образом. Камеру сглаживания пульсаций воздуха 4 подключают к сети генерации воздуха 1 через регулирующий вентиль 2. Изделия 9 помещаются в резонансную камеру 7 через выходной канал 6. Настройка установки на необходимый режим осуществляется посредством перемещения регулирующей заслонки 8 на размер C_1 или C_2 с последующей фиксацией заслонки 8. После этого осуществляют подачу воздуха в камеру сглаживания пульсаций воздуха 4 через регулирующий вентиль системы 2 от источника генерации воздуха 1. При этом в рабочую камеру 7 поступает заданный объем воздуха при соответствующем давлении, который контролируется при помощи манометра 3. Воздух, проходя через щелевое сопло 5 шириной 0,5–0,9 мм, образует давление и частоту звукового поля, которые обеспечивают вхождение в резонанс боковых стенок резонансной камеры 7.

Резонанс в установке воздействия возникает от следующих комбинаций действий [1]. Через щелевое сопло 5 часть воздуха уходит наружу, а часть воздуха нагнетается в полость резонансной камеры 7, что происходит за счет расщепления воздушного потока клиновидной частью регулирующей заслонки 8. Внутренний объем воздуха, находящегося в резонансной камере, зависит от положения регулирующей заслонки. При нагнетании в резонансную камеру воздуха давление в резонансной камере возрастает. Когда величина повышенного давления в камере превысит давление потока воздуха, поступающего из щелевого сопла, то повышенное давление заставляет воздух вытекать обратно из резонансной камеры. При выравнивании давлений внутри и снаружи воздух всё равно продолжит выходить наружу, поскольку поток воздуха, выходящий из резонансной камеры, обладает массой и скоростью, а значит, и кинетической энергией. Через некоторый промежуток времени воздух выйдет из резонансной камеры и при этом давление внутри резонансной камеры станет меньше, чем давление от воздушного потока, выходящего из щелевого сопла. Воздух снова устремится в резонансную камеру. Такие циклы будут повторяться неоднократно. При этом возникает явление резонанса Гельмгольца [2, 3] – стенки резонансной камеры под действием цикличности давления воздуха при совпадении частот колебаний воздуха в резонансной камере и снаружи камеры также начинают вибрировать с резонансной частотой. Так как внешняя сила воздуш-

ного потока, идущего от щелевого сопла наружу, возникает и исчезает с частотой, равной собственной частоте воздушного потока в полости резонансной камере, то явление резонанса будет постоянно.

Разработанная установка (рисунок 2) позволяет генерировать энергию за счет приведения волн звуковой частоты в резонансное состояние, что обеспечивает рекомбинацию разноимённых дефектов и восстановление узла кристаллической решётки, релаксацию структуры и аннигиляцию дислокаций.

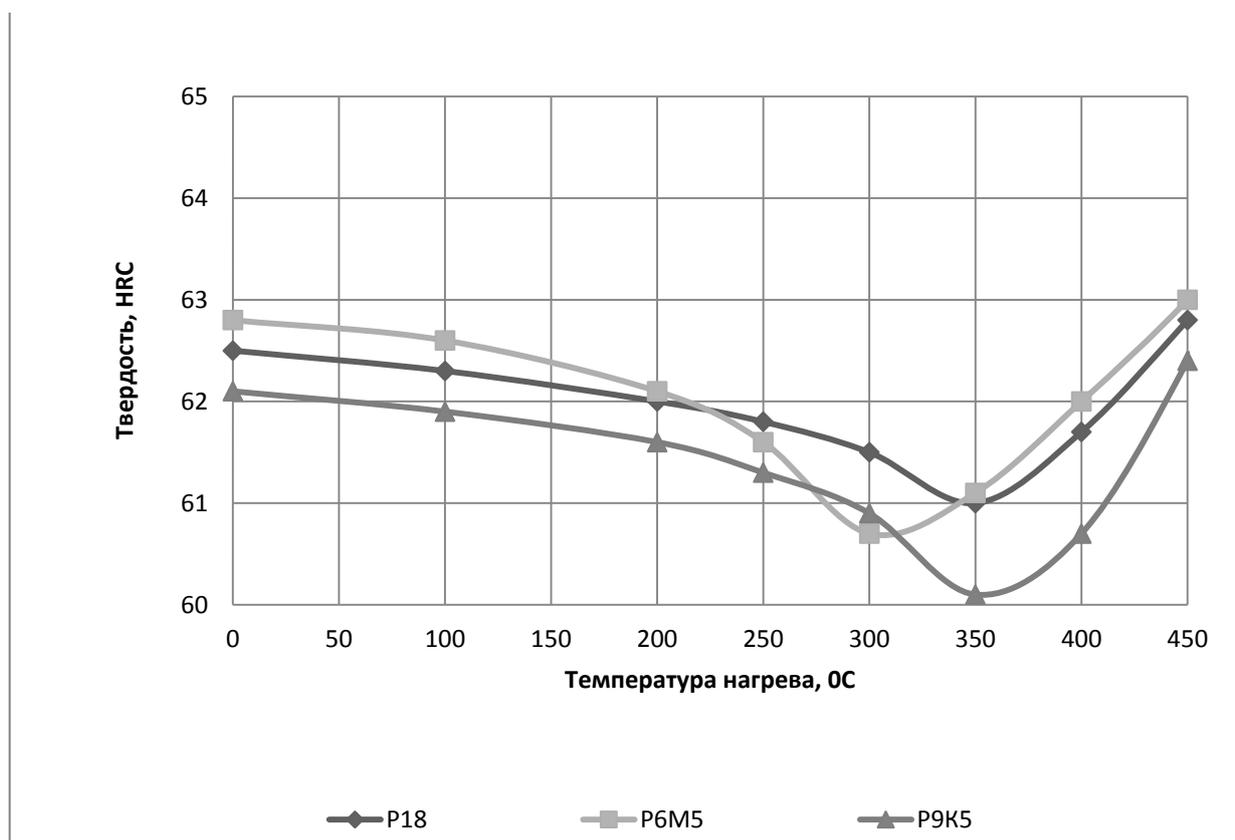


Рисунок 2 — Установка для аэродинамического звукового воздействия

Эффективность процесса аэродинамического звукового упрочнения реализуется через повышенный ресурс работы упрочненного инструмента. Осевой фрезерный инструмент, используемый при процессах прерывистого резания, должен обладать как можно высокой твердостью и ударной вязкостью.

Для запуска процесса аэродинамического звукового воздействия необходимо предварительно нагреть упрочняемое изделие до некоторой температуры. Причем, чем выше температура нагрева, тем более эффективнее будут происходить релаксационные изменения в изделии. Однако известно, что при нагреве быстрорежущих сталей происходит их структурный отпуск. В связи с чем необходимо установить такой режим температурного нагрева, при котором будут происходить максимальные релаксационные изменения в изделии, и одновременно изделие не потеряет свою исходную твердость. Такая температура соответствует нижнему порогу температуры хладноломкости [2, 4].

Аналитический расчет температуры хладноломкости весьма сложен. В связи с этим представляется целесообразным определить величину температуры хладноломкости экспериментальным образом для конкретных инструментальных материалов из быстрорежущих сталей. Экспериментальное определение температуры хладноломкости определялось путем нагрева различных образцов из быстрорежущих сталей в диапазоне температур 100–500 °С. После чего на твердомере ММП ИТМ определялась на каждом образце средняя величина твердости. Результаты исследований приведены на рисунке 3.



1 – P6M5, 2 – P18, 3 – P9K5

Рисунок 3 – Влияние температуры нагрева на твердость быстрорежущих сталей

Экспериментальные результаты исследований показывают, что температура хладноломкости для быстрорежущих сталей ориентировочно равна 280 °С. При таких температурах нагрева в быстрорежущих сталях будут происходить максимальные структурные релаксационные изменения и одновременно не произойдет снижение исходной твердости. Следовательно, при аэродинамическом звуковом воздействии на осевой фрезерный инструмент из быстрорежущих сталей необходимо осуществлять предварительный нагрев инструмента до температуры хладноломкости быстрорежущих сталей, равной 280 °С.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Жигалов, А. Н. Теоретические основы аэродинамического звукового упрочнения твердосплавного инструмента для процессов прерывистого резания : монография / А. Н. Жигалов, В. К. Шелег. – Могилев : МГУП, 2019. – 213 с.
2. Жигалов, А. Н. Теоретические и технологические основы аэродинамического звукового упрочнения твердосплавного инструмента для процессов прерывистого резания : дис. д-ра техн. наук : 05.02.07 / А. Н. Жигалов. – Минск, 2021. – 382 с.
3. Helmholtz, H. On the sensations of tone as a physiological basis for the theory of music / H. Helmholtz // London: Longmans, Green, and Co, – 2010. – P. 44.
4. Гуляев, А. П. Металловедение / А. П. Гуляев – Москва : Металлургия, 1986. – 544 с.

ВЛИЯНИЕ ПРОЦЕНТНОГО СОДЕРЖАНИЯ И ВИДА АКТИВАТОРА НА ШЕРОХОВАТОСТЬ ПОВЕРХНОСТИ ДИФФУЗИОННЫХ СЛОЕВ

Долгих А. М., Андрукович А. П., Косяк Л. Н., Анисимов В. С.

*Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой,
Полоцк, Беларусь*

Защитные покрытия различного типа все более широко применяются в современной промышленности. Поэтому исследование эксплуатационных свойств покрытий, к которым относится качество поверхности после насыщения, является актуальной задачей, определяющей возможность применения деталей машин с покрытиями без дополнительной механической обработки. Была исследована шероховатость поверхности образцов с нанесенными диффузионным методом защитными однокомпонентными покрытиями на основе карбидов хрома и ванадия и определена область возможной эксплуатации деталей. Также представляет практический интерес изучение влияния технологических факторов нанесения покрытий (вида активатора процесса насыщения, процентного содержания активатора, процентного содержания балластной добавки).

Введение

Одним из признанных методов повышения эксплуатационных характеристик деталей машин и инструмента является химико-термическая обработка (ХТО), которая радикальным образом изменяет состав и физико-химические свойства поверхностных слоев деталей машин, что позволяет значительно повысить их износостойкость, жаростойкость, коррозионную стойкости [1–5]. Это увеличивает надежность и долговечность машин, тем более, что современные требования к этим характеристикам постоянно возрастают. Необходимость широкого внедрения в промышленность наиболее перспективных процессов ХТО, изучение закономерностей формирования, состава и свойств диффузионных слоев приобретает все большее значение. Многочисленные литературные данные показывают, что диффузионные слои на основе карбидов переходных металлов обладают высокой жаростойкостью, износостойкостью и коррозионной стойкостью в ряде агрессивных сред.

Процессы диффузионного насыщения металлов и сплавов хромом изучены достаточно глубоко, в то время как ряд других перспективных процессов ХТО, например ванадирование, недостаточно освещены в литературе и не получили промышленного применения.

С учетом того обстоятельства, что настоящее исследование посвящено изучению свойств карбидных диффузионных слоев, и того, что наибольшее практическое применение получили карбидные слои на основе карбида хрома и карбида ванадия, более подробно рассмотрим эти процессы.

Материалы и методика исследований

Исследование механизма процесса восстановления и кинетики формирования диффузионных слоев проводили в силикотермических смесях с использо-

ванием в качестве восстановителя кремния и силикокальция. Процесс диффузионного хромирования проводили в исходной смеси, состоящей из следующих компонентов: хрома окиси (Cr_2O_3 марки «ч» ГОСТ 2912) – поставщика насыщающего элемента (хрома): порошка кремния (КР-1) или силикокальция (СК 25) – восстановителя; оксида алюминия (Al_2O_3 марки «ч») – балластной добавки; аммония хлористого (NH_4Cl марки «ч») – активатора процессов восстановления и насыщения. Процессы диффузионного насыщения проводили в металлических контейнерах по стандартной технологии газового насыщения в порошковых смесях.

Шероховатость поверхности (ГОСТ 2789-73) в значительной степени определяет основные эксплуатационные свойства деталей и узлов машин- износостойкость, сопротивление усталости, надежность, контактную жесткость и теплопроводность стыков сопряженных деталей, коррозионную стойкость, герметичность соединений, отражающую и поглощающую способность поверхностей и др. Поэтому характеристики шероховатости поверхности строго нормируются и подвергаются постоянному анализу в технологических исследованиях и контролю в процессе производства.

Шероховатость поверхности, получаемая при насыщении поверхности деталей машин, зависит от многих технологических факторов: материала и качества поверхности исходного вида; механических свойств, химического состава и структуры материала заготовки; состава насыщающей смеси, активатора и т. д.

Таблица 1 – Исследуемые составы силикотермических смесей

Тип слоя	Состав смеси
Cr (20 %Кр1)	98 % [30% Al_2O_3 +70 % (20 % Кр.1+80 % Cr_2O_3)] +2 % NH_4Cl
Cr (20 %СК25)	98 % [40% Al_2O_3 +60 % (20 % СК25+80 % Cr_2O_3)] +2 % NH_4Cl
Cr (25 %СК25)	98 % [40% Al_2O_3 +60 % (25 % СК25+75 % Cr_2O_3)] +2 % NH_4Cl
V (30 %СК25)	98 % [40% Al_2O_3 +60 % (30 % СК25+70 % V_2O_5)] +2 % NH_4Cl
V (35 %СК25)	98 % [40% Al_2O_3 +60 % (35 % СК25+65 % V_2O_5)] +2 % NH_4Cl

Исследование диффузионных защитных покрытий, полученных методом химико-термической обработки, проводили на образцах, изготовленных из стали марки У10 ГОСТ 1435.

Ванадирование

В состав исходной смеси для диффузионного ванадирования входят следующие компоненты: пятиокись ванадия (марки «ч»), силикокальций, окись алюминия, хлористый аммоний.

Соотношение $V_2O_5:Ca$ и $V_2O_5:Si$ должно быть равно соответственно 47,6: 52,4 и 72,2: 27,8. При содержании в смеси СК25 до 35 – проходит процесс ванадирования. При содержании силикокальция в смеси до 20 % – происходит неполное восстановление V_2O_5 , при этом окислы ванадия активно растворяют образцы и детали машин. Уменьшение толщины образцов из сталей У10 достигает 0,75 мм на диаметр.

Проведено исследование влияния процентного содержания и вида активатора процесса диффузионного насыщения на шероховатость поверхности образцов и деталей машин, полученной после проведения процесса.

Таблица 2 – Влияния процентного содержания активатора на шероховатость поверхности (Ra, мкм) после нанесения карбидных ванадированных покрытий

Состав смеси для ванадирования:

[40 % Al₂O₃+60 % (30 % CaSi+70 % V₂O₅)]+2 % А

№ образца	n % Al ₂ O ₃	(100-n) смеси		Активатор, А	% содержание активатора	Толщина слоя, мкм	Шероховатость, Ra, мкм
		CaSi	V ₂ O ₅				
1	40	30	70	NH ₄ Cl	0,5	38	1,140
2	40	30	70		1	35	1,579
3	40	30	70		2	35	1,310
4	40	30	70		3	29	1,192
5	40	30	70	AlF ₃	0,2	37	1,437
6	40	30	70		0,5	33	1,381
7	40	30	70		1	23	1,477
8	40	30	70		2	29	1,323
9	40	30	70		5	23	0,888
10	40	30	70	NaF	0,5	33	0,889
11	40	30	70		1,5	29	0,937
12	40	30	70		2	28	1,204

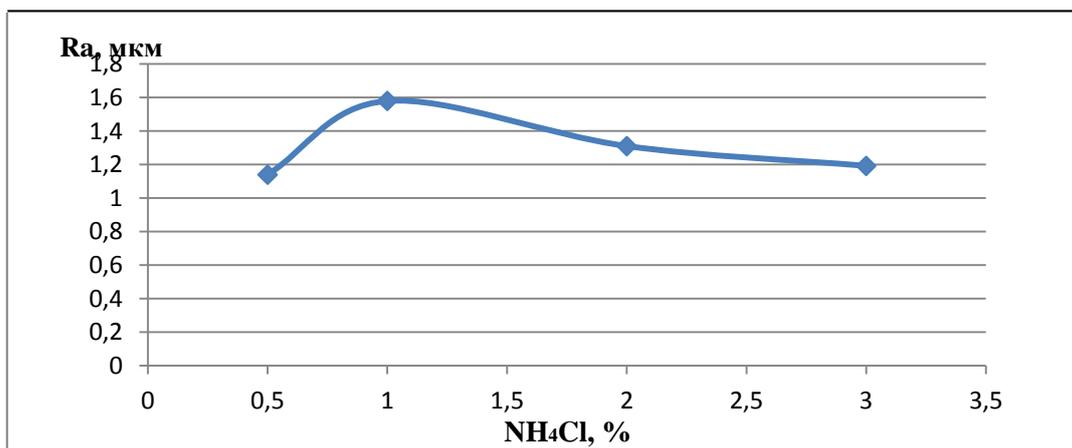


Рисунок 1 – График влияния процентного содержания активатора NH₄Cl на шероховатость поверхности

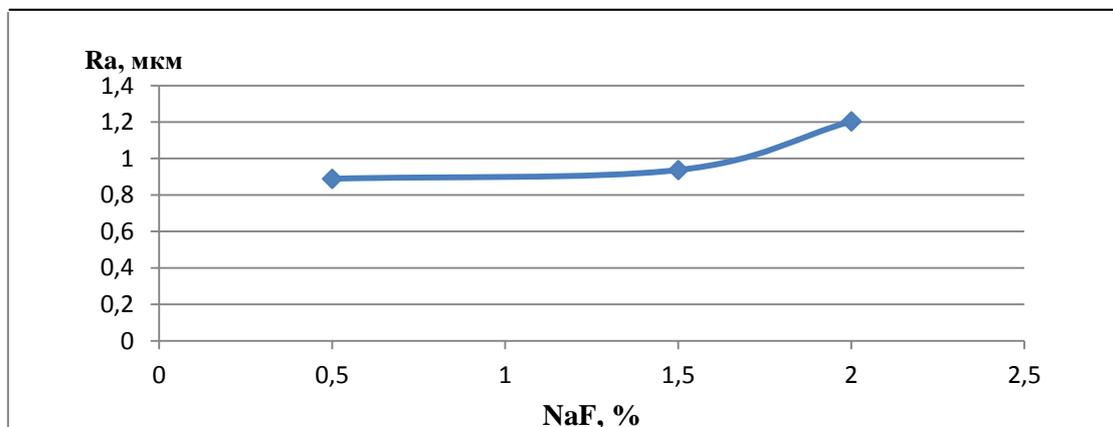


Рисунок 2 – График влияния процентного содержания активатора NaF на шероховатость поверхности

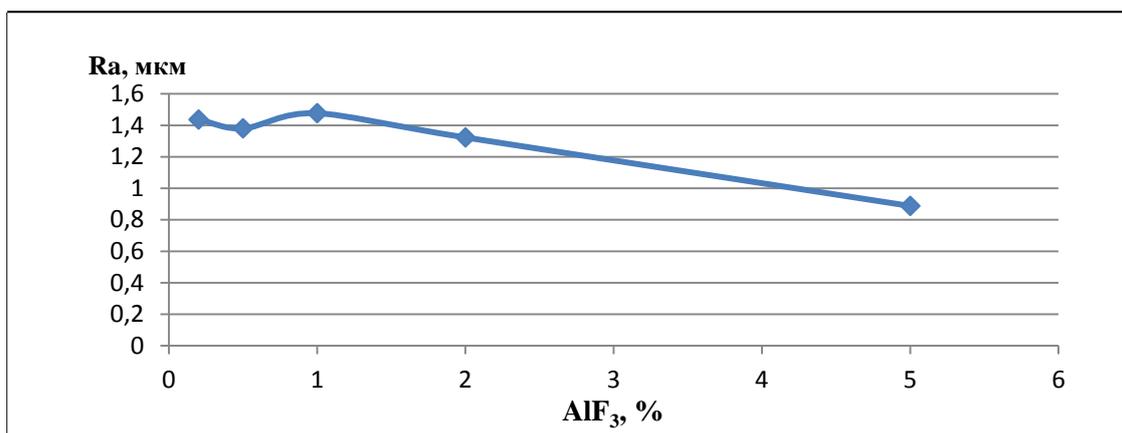


Рисунок 3 – График влияния процентного содержания активатора AlF_3 на шероховатость поверхности

Одним из технологических факторов, реально влияющих на параметры шероховатости поверхности после проведения процесса диффузионного насыщения, является процентное содержание балластной добавки – окиси алюминия.

Таблица 3 – Влияние процентного содержания балластной добавки на шероховатость поверхности

Смесь: $n\% Al_2O_3 + (100-n)\%$ (% CaSi+% V_2O_5)

№ образца	n % Al_2O_3	(100-n) смеси		Активатор NH_4Cl %	Толщина, фазовый состав У10, мкм	Шероховатость, Ra, мкм
		CaSi	V_2O_5			
1	20	30	70	2	90,5	1,765
2	40	30	70	2	48	1,537
3	50	30	70	2	41	1,011

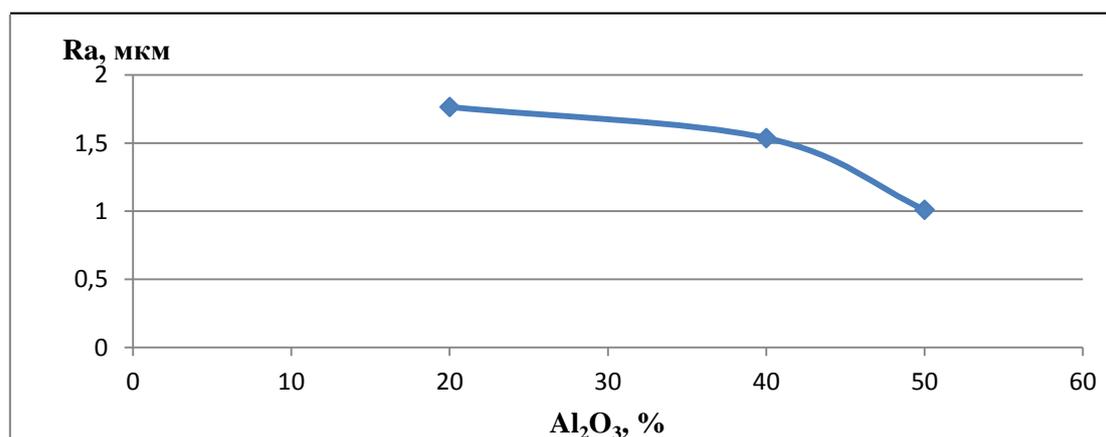


Рисунок 4 – График влияния процентного содержания балластной добавки Al_2O_3 на шероховатость поверхности

Выводы

– Проведенные исследования убедительно показывают, что на параметры шероховатости поверхности, полученные после нанесения покрытий диффузионного типа, существенное влияние оказывают как вид применяемого активатора, так и его процентное содержание в насыщающей смеси.

– При проведении процессов диффузионного ванадирования все три вида примененных активаторов оказывают практически одинаковое влияние на изменение величины шероховатости, полученной после обработки поверхности. Характер кривых также идентичен с выраженным максимумом повышения величины шероховатости поверхности.

– Изменение процентного содержания балластной добавки в насыщающей смеси также существенно влияет на величину шероховатости, полученной после диффузионного насыщения поверхности. С повышением процентного содержания балластной добавки происходит снижение параметров шероховатости.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Долгих, А. М. Химико-термическая обработка материалов: учеб.-метод. комплекс / А. М. Долгих. – Новополоцк : ПГУ, 2010. – 224 с.
2. Ворошнин, Л. Г. Теория и технология химико-термической обработки: учеб: Пособие / Л. Г. Ворошнин. – Минск : Новое знание, 2010. – 304 с.
3. Металловедение. Термическая и химико-термическая обработка сплавов: сб. научн. трудов / под ред. Б. Н. Арзамасова. – М. : Изд-во МГТУ, 2003. – 246 с.
4. Многокомпонентные диффузионные покрытия / Л. С. Ляхович [и др.]. – Минск : Наука и техника, 1974. – 288 с.
5. Стуканов, В. А. Металловедение: учеб. пособие / В. А. Стуканов. – Москва : ИНФРА-М, 2008. – 368с.

УДК 620.179.14

ВЛИЯНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ ВОЗДЕЙСТВИЯ ИМПУЛЬСНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА СТЕПЕНЬ ИЗНОСА УПРОЧНЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ

Калугин¹ Ю. К., Лещик² С. Д.

*Гродненский государственный университет имени Янки Купалы,
Гродно, Республика Беларусь*

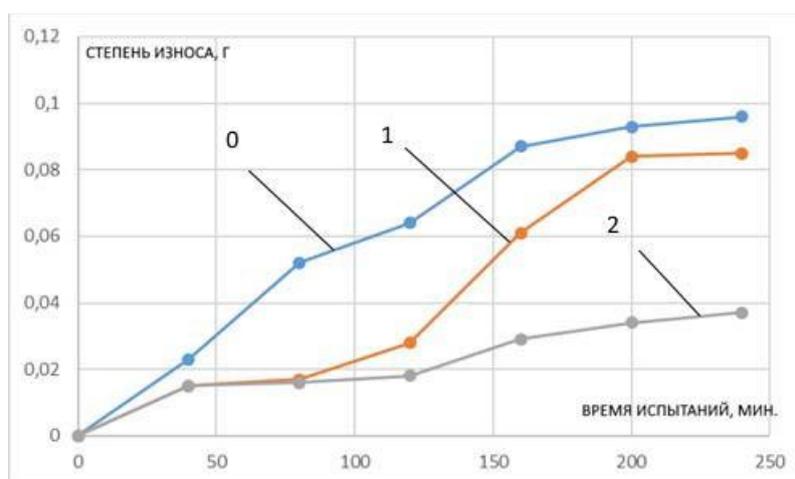
Обработка металлов магнитным импульсом характеризуется воздействием нестабильных магнитных полей на материал с максимальным напряжением $2...3 \cdot 10^7$ А/м и импульсными токами до $5 \cdot 10^5$ А и благодаря работе этого магнитного импульса и импульсному нагреву металла. Во время обработки магнитным импульсом происходит воздействие концентрированного электромагнитного поля на дефекты структуры. Изменение температурных градиентов и термоупругих сжимающих напряжений в зоне упрочнения приводит к локализации или полному сглаживанию дефектов микроструктуры. Глубина проникновения магнитного поля зависит от частоты электромагнитных колебаний и электропроводности материала. Следовательно, при таком способе обработки можно изменять свойства поверхностного слоя детали. Действие магнитного поля вызывает изменения структуры материала, что приводит к изменению механических характеристик обрабатываемых материалов [1]. Возможности технологии магнитно-импульсного упрочнения обработки (МИУ) позволяют при

обработке деталей варьировать не только напряженностью поля, но и его полярностью, продолжительностью и амплитудой импульсов, а также временем выдержки при обработке и после нее. Установлено, что практическим эффектом МИУ для различных сталей является повышение срока службы рабочих поверхностей, связанных с интенсивным износом: на 150 %...200 % – для режущего инструмента, на 120 %...180 % – для деталей машин, работающих на основе сил трения [3]. Однако приведенные данные не являются точными и в значительной степени зависят от свойств материалов и условий работы деталей и оборудования.

Целью выполняемых исследований является детальное изучение структурных и фазовых изменений в поверхностном слое ответственных деталей ткацкого оборудования, способствующих повышению их износостойкости, и возможности использования магнитно-импульсной упрочняющей обработки как предварительной, при разработке комбинированных технологий упрочнения.

Основываясь на результатах теоретических исследований и литературных источников, можно предположить, что внешнее магнитное поле при обработке материалов МИУ способствует направленной ориентации доменов, что в свою очередь вызывает возникновение внутренних напряжений перемещению дислокаций в объеме и в поверхностном слое, что затрудняет пластическое деформирование поверхности и уменьшает износ детали.

Для проведения экспериментального лабораторного исследования влияния намагничивания на величину износа использовалась модернизированная машина трения типа МИ, предусматривающая испытания по схеме «диск-образец». В качестве образцов использовались детали «корпус прокладчика» с упрочненной поверхностью, закрепленные в специальном штативе. Такой способ взаимодействия образца с контртелом был выбран для максимального приближения к реальным условиям эксплуатации данного вида деталей [2]. Износ образцов определялся микрометрическим и весовым способом. Контролировались размерные характеристики элементов детали, наиболее подверженные износу, и вес детали до и после испытания. Диаграмма, построенная по результатам испытаний, показана на рисунке 1.

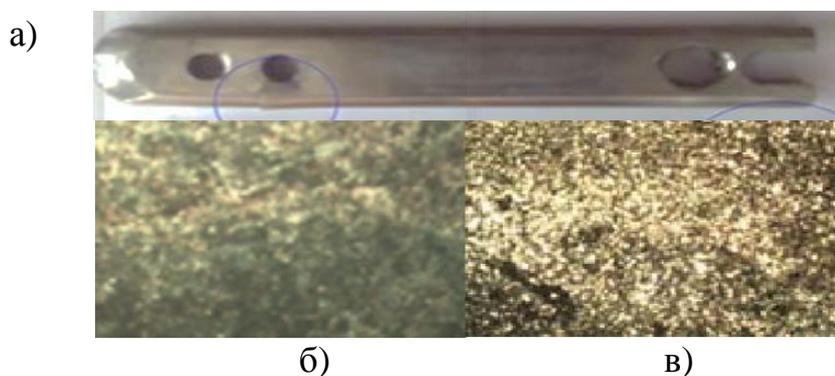


0 – неупрочненный образец; 1 – зависимость для образцов при $n = 3$;
2 – зависимость для образцов при $n = 6$, (n – количество импульсов)

Рисунок 1 – Влияние параметров магнитно-импульсной обработки на степень износа упрочненных деталей ($E = 8$ кДж)

На диаграмме зависимость (0) отражает изменение степени износа необработанных деталей от времени. Магнитное воздействие на поверхность детали с количеством импульсов – 3, в незначительной степени повышает устойчивость к износу поверхности (зависимость – 1). Увеличение износа особенно активно возрастает после первого часа испытаний и на завершающем этапе испытаний приближается к необработанному материалу. Частично это объясняется изменением геометрических поверхностей детали после первичной приработки. На этих этапах обработки среднее повышение износостойкости достигает ориентировочно 18 %... 20 %. Для такой степени упрочнения нецелесообразно применять этот метод как основной. Значительно эффективней обработка с энергетическими показателями – 6 импульсов (энергия каждого импульса – 8 кДж). Такой вид упрочнения позволяет получить (по результатам испытаний контрольных образцов) повышение износостойкости в пределах 40 %... 60 %.

Применение технологических решений, способствующих значительному повышению износостойкости и долговечности деталей, предполагает использование более 3–4 электромагнитных импульсов. Особенно эффективно при воздействии на поверхностный слой 4 и более импульсов (рисунок 3.2). Значительное понижение степени износа (более 50 %), по результатам экспериментальных измерений, достигается уже после 6 импульсов. Это значение имеет место для элементов конкретной детали. Анализируя затраты энергии для упрочнения, следует сопоставлять себестоимость обработки и детали. На данном этапе исследования такие условия и режимы обработки рассматривались для применения магнитно-импульсной обработки как составной части комплексных решений. Не исключается, что для такого использования может применяться и меньшее количество импульсов обработки (рисунок 2).



*а – деталь «прокладчик утка»; б – микроструктура поверхности образца без упрочнения;
в – микроструктура поверхностного слоя упрочненного образца*

**Рисунок 2 – Структура поверхностного слоя детали «нитепрокладчик»
после магнитно-импульсной обработки**

При магнитном воздействии поверхность детали изменяет свои физические и механические свойства: сглаживаются дефекты в кристаллической решетке, снимаются внутренние напряжения, становится более однородной и измельчается структура металла. Улучшение свойств у образца, прошедшего МИО, достигается за счет направленной ориентации свободных доменов вещества при воздействии внешнего поля. После воздействия МИО на плоскостях деталей образуется мелкодисперсный слой глубиной 200...260 мкм, по торцам – более

крупные светлые образования глубиной 40...100 мкм. Структурные изменения в поверхностном слое по результатам предварительного оценивания создают дополнительные препятствия для перемещения дислокаций в поверхностном слое, и как следствие, препятствуют пластическому деформированию на поверхности деталей. Такое структурное состояние создает благоприятные условия для дальнейшего упрочнения в комплексе с другими методами обработки.

Заключение

Проведенное исследование метода упрочнения поверхностного слоя специализированных деталей, изготовленных из доэвтектоидной стали, способствовало выявлению наиболее рациональных режимов магнитно-импульсной обработки и, в перспективе, применения этого вида упрочнения для комплексной обработки совместно с другими высокоэнергетическими методами, при схожем протекании фазовых изменений в поверхностной структуре материала. Несмотря на незначительное повышение числа микротвердости (при магнитно-импульсной обработке – 12...14 %), от значения 425 HV до значения 535 HV, для деталей, выполненных из стали 40X, показатели структуры поверхностного слоя подтверждают возможность значительного улучшения прочностных характеристик материала.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Алифанов А. В., Горецкий Г. П., Милюкова А. М., Лях А. А., Шишмолин В.Н. Исследование влияния режимов магнитно-импульсной обработки на микротвердость и микроструктуру образцов сталей, применяемых для изготовления рубильных ножей / А. В. Алифанов [и др.] // Вестник Барановичского государственного университета. Серия: Технические науки. – 2016. – № 1. – с. 12.
2. Калугин, Ю. К. Сравнительный анализ методов поверхностного упрочнения деталей ткацких станков / Ю. К. Калугин, Б. А. Бакулин // Вестник Брестского государственного технического университета. – 2017. – № 4(106): Машиностроение. – С. 24–27.
3. Глуценков В. А. Технология магнитно-импульсной обработки материалов: монография / В. А. Глуценков, В. Ф. Карпухин – Самара : Изд. дом «Федоров», 2014. – 208 с.

УДК 621.791

ВЛИЯНИЕ СТРУЙНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ГАЗООБРАЗНОЙ ОХЛАЖДАЮЩЕЙ СРЕДЫ В ОБЛАСТИ СВАРНОГО ШВА И ЗОНЫ ТЕРМИЧЕСКОГО ВЛИЯНИЯ ПРИ СВАРКЕ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ

*Лецик С. Д., Лежава А. Г., Исаков С. А., Жуковский В. Е.
Гродненский государственный университет имени Янки Купалы,
г. Гродно, Республика Беларусь*

Введение

Требования к металлическим элементам конструкции современной техники по показателям надежности постоянно возрастают. Так, например, машины и механизмы в сфере транспорта должны удовлетворять нагрузочно-скоростным

режимам эксплуатации, в добывающей отрасли – обеспечивать высокую производительность при безотказной работе и т. д. Зачастую отказы в работе техники происходит из-за выхода из строя различных видов соединений элементов конструкции. Сварные соединения являются одним из наиболее распространенных видов неразъемных соединений, используемых во всех видах техники. Сварка имеет ряд преимуществ по сравнению с другими видами соединений: обеспечивает высокую технологичность при изготовлении и ремонте изделий, а также снижение массы конструкции, дает возможность соединять разнообразные по форме детали, является герметичным соединением. В то же время сварные соединения имеют и недостатки. Например, при сваривании деталей возникают остаточные деформации, появляются внутренние напряжения, а также могут образовываться трещины. Кроме того, при удовлетворительной статической прочности сварные соединения зачастую хуже работают при динамических и циклических нагрузках. В процессе остывания сварного шва и зоны термического влияния может формироваться структура металла, которая не является оптимальной для достижения максимальной прочности и циклической долговечности. Для улучшения прочностных характеристик сварные соединения подвергают поверхностно-пластическому деформированию (дробеструйная обработка, обкатка роликами) [1], ультразвуковой ударной обработке [2]. Так, например, по результатам исследований ряда авторов [2] установлено, что ударная ультразвуковая обработка стальных сварных соединений приводит к изменению структурно-фазового состояния приповерхностного слоя в области сварного шва и зоны термического влияния (ЗТВ), что приводит к росту усталостной прочности соединения. Другим технологическим способом, позволяющим управлять структурой и характеристиками сварного соединения, является оптимизация теплового режима [3, 4] в процессе сварки. В работе [3] отмечается, что с целью предотвращения трещин и разрывов, связанных с возникновением остаточных напряжений и деформаций при сварке встык жестко закрепленных деталей, целесообразно применять пониженные тепловые режимы. Результаты исследования влияния периодического охлаждения на формирование структуры сварных соединений, изложенные в работе [4], показывают перспективность такого подхода в управлении кинетикой протекания структурных превращений в материале сварного соединения.

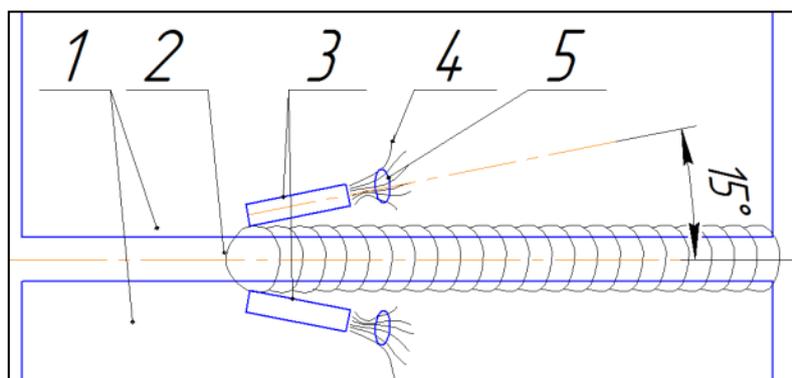
Задача, решаемая в настоящей работе: исследовать влияние на характеристики сварного соединения газодинамического воздействия охлаждающей среды на сварной шов и зону термического влияния в процессе сварки. Объект исследования – стыковые сварные соединения из стальных деталей.

Материалы и методика эксперимента

Для практической реализации метода модификации структуры и свойств сварных соединений путем струйного воздействия охлаждающей среды на сварной шов и зону термического влияния была разработана и собрана экспериментальная установка, описанная ранее в [5]. Установка представляет автоматическое устройство для дуговой сварки и обеспечивает выполнение механизмами следующих операций, возбуждение дуги в начале сварки; поддержание дугового процесса; подачу сварочных материалов в зону дуги по мере их оплавления; относительное перемещение дуги вдоль линии сварного соедине-

ния путем перемещения сварочной головки; подачу защитного и охлаждающего газа; прекращение процесса сварки.

Экспериментальные исследования проводили на образцах из стали 08КП, полученных свариванием 2-х пластин механизированной однопроводной сваркой в среде защитного газа (сварочная смесь) и при струйном воздействии охлаждающего газа (аргон либо углекислый газ) на сформировавшийся сварной шов и зону термического влияния. Использовали схему из двух подающих охлаждающий газ сопел, расположенных симметрично по разные стороны шва (рисунок 1). Применяли сварочную проволоку СВ08Г2С диаметром 1,2 мм. Напряжение и сила тока при сварке 24 В и 200 А соответственно. Предварительный подогрев заготовок и последующую термообработку образцов не производили. Управляемые параметры варьировали на 2-х уровнях (таблица 1).

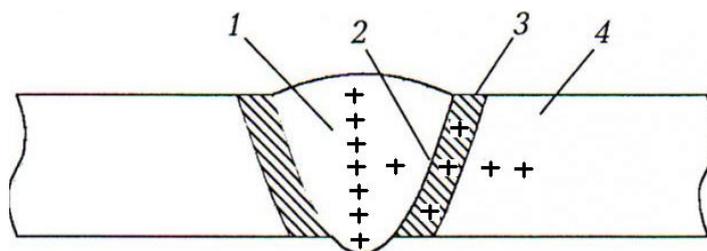


1 – свариваемые детали; 2 – сварной шов; 3 – сопла;
4 – распространение охлаждающего газа;
5 – зона контакта охлаждающего газа с основным металлом
Рисунок 1 – Схема установки сопел (вид сверху)

Таблица 1 – Матрица планирования полного факторного эксперимента

Изменяемый параметр	Номер серии экспериментов							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Охлаждающий газ	Ar	CO ₂	Ar	CO ₂	Ar	CO ₂	Ar	CO ₂
Расход охлаждающего газа, л/мин	15	15	20	20	15	15	20	20
Диаметр сопла, мм	0,8	0,8	0,8	0,8	2,0	2,0	2,0	2,0

Измерение микротвердости образцов производили на микротвердомере ПМТ-3. Схема сварного шва и точки измерения микротвердости приведены на рисунке 2.



1 – сварной шов, 2 – зона сплавления,
3 – зона термического влияния, 4 – основной металл
Рисунок 2 – Схема сварного шва и точки измерения микротвердости (+)

Оценку угловых сварочных деформаций проводили на основе результатов измерения угла β по схеме, приведенной на рисунке 3.

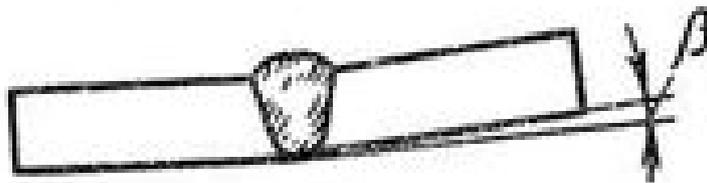


Рисунок 3 – Схема измерения угловых сварочных деформаций

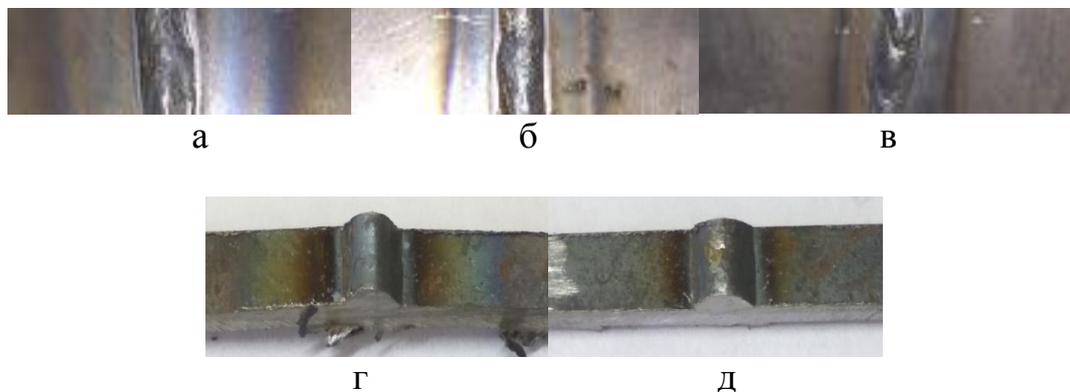
Результаты и их обсуждение

Результаты измерений угловых сварочных деформаций показали, что угол β (согласно схеме на рисунке 3) для образцов, полученных сваркой без струйного воздействия газообразной охлаждающей среды, составляет в среднем 4° , при сварке с использованием для охлаждения аргона – около 3° , а при использовании углекислого газа – не превышает 2° .

Микротвердость по сечению образцов, полученных сваркой при описанных выше условиях без использования охлаждающего газа, почти не меняется и близка к значению этого показателя у основного металла. Анализ результатов измерения микротвердости в сечении сварных соединений, полученных из стали 08КП в режиме газодинамического охлаждения, показал следующее. Наибольшее значение микротвердости наблюдается в зоне термического влияния. Наблюдается рост до 7 %. При этом на максимальное значение микротвердости оказывают влияние технологические параметры процесса сварки, а именно диаметр сопла, подающего охлаждающий газ, вид и расход охлаждающего газа. Установлено, что факторы, способствующие возрастанию скорости охлаждения металла приводят к росту максимальных значений микротвердости по сечению образца. Выявлено, что при использовании углекислого газа достигается большее значение микротвердости, чем при использовании аргона. Это можно объяснить большей теплоемкостью углекислого газа, дающей возможность эффективнее охладить металл. Увеличение расхода охлаждающего газа с 15 до 20 л/мин также приводит к увеличению максимальных значений микротвердости. При постоянном же расходе охлаждающего газа увеличение скорости охлаждения и, соответственно, микротвердости обеспечивается ростом скорости движения газа за счет уменьшения диаметра сопла.

Изображения образцов, полученных в результате сварки закрепленных стальных пластин встык при различных режимах охлаждения углекислым газом и аргоном, а также без охлаждения, представлены на рисунке 4, где видно, что динамическое воздействие струи охлаждающего газа оказывает влияние на размеры ЗТВ сварного шва. Установлено, что при использовании сопел диаметром 0,8 мм и 2 мм и одинаковом расходе газа в единицу времени, ширина видимой зоны термического влияния уменьшается в 2–2,3 раза и 2,2–2,5 раза, соответственно, по сравнению со сваркой без охлаждения. Как можно видеть при изменении диаметра сопел более чем в 2 раза, ширина ЗТВ уменьшается незначительно. Предположительно охлаждающая способность сопел диаметром, равным 2 мм, может быть больше, т. к. увеличивается площадь контакта

потока охлаждающего газа с охлаждаемой поверхностью. В то же время достаточно высокую эффективность воздействия охлаждающего газа при использовании сопел диаметрами 0,8 мм можно объяснить тем, что при их использовании за счет увеличения скорости истечения образуется турбулентный поток газа, активно охлаждающий сварной шов и прилегающий к нему материал.



а – без охлаждающего газа; б, в, д – охлаждение углекислым газом; б, – охлаждение аргоном; а, б, г, д – диаметр подающего охлаждающий газ сопла 0,8 мм; в – диаметр сопла 2 мм

Рисунок 4 – Изображения сварного шва и зоны термического влияния для различных условий сварки

Оценка размеров зоны термического влияния в зависимости от используемого охлаждающего газа показала, что при использовании углекислого газа зона термического влияния на 35–40 % меньше, чем при использовании аргона. Это может быть обусловлено большей удельной теплоемкостью углекислого газа и, соответственно, большей охлаждающей способностью.

Увеличение расхода охлаждающего газа с 15 до 20 л/мин во всех случаях приводит к уменьшению размеров зоны термического влияния.

Заключение

Практически реализован способ получения сварных соединений методом механизированной однопроходной электродуговой полуавтоматической сварки в среде защитного газа с последующим газодинамическим охлаждением сварного шва и зоны термического влияния аргоном либо углекислым газом. Результаты исследований микротвердости, угловых деформаций и размеров зоны термического влияния позволяют сделать вывод о том, что струйное воздействие охлаждающей газовой среды на сварной шов и зону термического влияния в процессе сварки может рассматриваться как инструмент управления эксплуатационными характеристиками сварного соединения.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Патон, Б. Е. О повышении несущей способности и долговечности сварных соединений / Б. Е. Патон, В. И. Труфьяков // Автоматическая сварка. – 1982. – № 2. – С. 1–6.

2. Влияние ультразвуковой ударной обработки на структуру и сопротивление усталости сварных соединений высокопрочной стали ВКС-12 / В. Е. Панин [и др.] // Физическая мезомеханика – 2006. – Т. 9. – № 2. – С. 85–96.

3. Сальманов, И. Д. Остаточные напряжения и деформации при сварке / И. Д. Сальманов, М. Ю. Барановский, В. А. Тарасов // Строительство уникальных зданий и сооружений. – 2014. – № 12. – С. 64–75.

4. Савицкий, А.М. Влияние скорости сварки и длительности периодического охлаждения на формирование структуры сварных соединений закаливаемых сталей при дуговой сварке с термоциклированием / А. М. Савицкий, М. М. Савицкий, Д. П. Новикова // Автоматическая сварка. – 2004. – № 8. – С. 41–45.

5. Разработка конструктивно-технологической схемы установки для получения сварных соединений с использованием струйного воздействия охлаждающей среды на сварной шов и зону термического влияния / С. Д. Лещик [и др.] // 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»; под общ ред. Г. В. Миловзорова. – Ижевск : Изд-во УИР ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, 2021. – С. 135–138.

УДК 621.357+537.528

ИЗУЧЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ГАЛЬВАНИЧЕСКИХ ЭЛЕКТРОЛИТОВ С ДОБАВКОЙ НАНОЧАСТИЦ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОГО ДИСПЕРГИРОВАНИЯ ТВЕРДОФАЗНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Лещик С. Д., Калугин Ю. К., Лещик М. С.

*Гродненский государственный университет имени Янки Купалы Гродно,
Республика Беларусь*

Введение

Стандартные электролиты хромирования на основе шестивалентных соединений хрома в настоящее время хорошо изучены и широко применяются. Однако процесс хромирования и электролиты хромирования имеют ряд существенных недостатков: низкий выход хрома по току; небольшая скорость отложения осадков; большая энергоемкость процесса; высокая катодная плотность тока; высокая агрессивность электролита; большое количество ядовитых выделений, образующихся при электролизе; низкая кроющая способность электролита; низкая рассеивающая способность электролита, выражающаяся в низкой степени равномерности распределения выделяемого на катоде металла по его поверхности. В связи с этим модификация электролитов, направленная на уменьшение указанных недостатков, весьма актуальна. Так, например, повышение рассеивающей способности электролита позволяет получать более равномерные покрытия по толщине, что дает возможность наносить меньший слой хрома перед окончательной шлифовкой поверхности. Выгода очевидна: снижение затрат на энергоемкий процесс хромирования (требуемая толщина хрома меньше) и снижение затрат на шлифование весьма твердого покрытия (припуск на шлифование меньше). Одним из способов решения задачи по улучшению характеристик электролитов, процесса хромирования и самих покрытий из гальванического хрома является добавление ультрадисперсных добавок непо-

средственно в электролит, т. е. применение наноэлектролитов [1, 2]. Однако, имеющиеся данные по влиянию нанодобавок на характеристики электролитов нельзя признать всеобъемлющими и полностью систематизированными. Это обусловлено следующим. Во-первых, в настоящее время расширяются возможности синтеза наночастиц, которые ранее синтезированы не были. Во-вторых, производители и исследователи зачастую не раскрывают состав, особенности синтеза и некоторые характеристики используемых частиц. В-третьих, подробной информации о внедрении наноэлектролитов в производственный процесс мало. В связи с этим представляется актуальным накопление и анализ экспериментальных данных о наномодификаторах гальванических электролитов, их влиянии на процесс хромирования и свойства электролитов.

Целью настоящей работы явилось изучение влияния наноразмерных частиц, синтезированных при электроэрозионном диспергировании алюминия и графита, на характеристики электролита хромирования.

Материалы и методика эксперимента

Экспериментальные исследования проводили для стандартного и наиболее широко применяемого электролита хромирования следующего состава: ангидрид хромовый – 250 г/л, кислота серная 2,5 г/л, остальное – вода.

Выход металла по току рассчитывали по стандартной методике. Для этого определяли массу покрытия путем взвешивания образцов до и после металлизации.

Контрольные образцы были получены осаждением из электролита, указанного выше состава. Модифицированные образцы получали из электролитов, в которые были приготовлены на основе воды, в которой производили электроэрозионное диспергирование алюминиевого и графитового образцов. Для синтеза ультрадисперсных частиц использовали две установки, в которых реализован принцип электроискровой эрозии по двум различным схемам: с колеблющимся и вращающимся электродом.

На рисунке 1 приведена электрическая схема экспериментальной установки получения наноструктур методом электроэрозионного диспергирования твердофазных электропроводящих образцов в жидкости с колеблющимся электродом [3], на основе которой рассмотрим принцип ее работы, а также принцип получения наночастиц. В качестве источника питания используется трансформатор мощностью 170 Вт со ступенчатой регулировкой напряжения на вторичных обмотках в диапазоне 6–30 В.

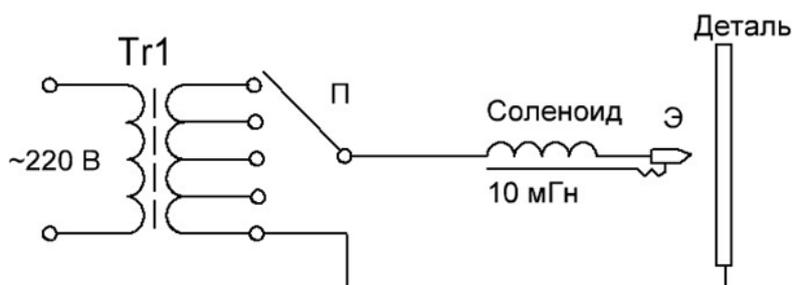


Рисунок 1 – Электрическая схема установки с колеблющимся электродом

Со вторичных обмоток трансформатора Tr1 переключателем П напряжение поступает через Соленоид на электрод Э. Сердечник Соленоида механически связан с электродом пружиной. При замыкании цепи – соприкосновении электрода Э с Деталью – возникает искровой разряд. Сердечник соленоида совершает колебания с частотой переменного тока на электроде периодически замыкающая и размыкающая цепь. Соленоид выполняет двойную роль в этой схеме: дросселя ограничения тока в цепи и электромагнита управления колебаниями рабочего тела электрода. Электрод и деталь являются материалами, которые подвергаются электроимпульсному разрушению. Они погружены в жидкость, в которую конденсируются наночастицы из плазмы электроискрового разряда, возникающего между электродом и деталью.

При реализации схемы электроэрозионного синтеза наночастиц по второй схеме применяли вращающийся цилиндрический или дисковый электрод и неподвижный электрод в форме пластины. В качестве материала твердофазного полуфабриката для электроэрозионного разрушения использовали графит или алюминий, из которых изготавливали неподвижный и вращающийся электроды. В качестве жидкости, в которой производили электроэрозионное разрушение твердофазных полуфабрикатов, использовали воду. Суть процесса в следующем. Вершины неровностей на поверхности плоского электрода отделены от диска (вращающийся электрод) очень небольшим промежутком, через который легко проскакивает разряд, и подвергаются электрической эрозии. В точке электрического разряда материал плавится и испаряется. Окружающая жидкость также испаряется. В результате вращения электрода и развивающихся в канале разряда и продуктах распада рабочей жидкости значительных динамических сил, продукты электроэрозионного разрушения материала выбрасываются за пределы зоны разряда в рабочую жидкость, где происходит конденсация и формирование частиц. Электроэрозионный синтез частиц по схеме с вращающимся электродом проводили при следующих параметрах. Использовали генератор импульсов, который подключали к неподвижному и вращающемуся электродам, погруженным в жидкость (вода). Рабочая частота генератора импульсов составляла 180 кГц. Диапазон регулирования выходного напряжения 1,2–22 В. Пульсации выходного напряжения (эффективное значение) не более 150 мВ. Выходной ток (максимум) 12 А. Емкость накопительных конденсаторов 2200–11000 мкФ. Энергия в искровом разряде составляла 1,6 мДж – 2,2 Дж.

Размер частиц оценивали методом атомно-силовой микроскопии.

Результаты и их обсуждение

Перед использованием частиц, синтезированных при электроэрозионном диспергировании алюминия и графита, в составе гальванических электролитов, была произведена оценка их размеров. Методом атомно-силовой микроскопии установлено, что более 70 % синтезированных частиц имеют размер до 100 нм.

Результаты экспериментальных исследований по определению выхода металла по току при хромировании из электролитов содержащих продукты электроэрозионного разрушения алюминия и графита, приведены в таблице 1. Как можно видеть из представленных данных, на выход хрома по току, независимо от концентрации в электролите продуктов электроэрозионного дисперги-

рования алюминия и графита, влияние оказывает изменение катодной плотности тока и температуры. Добавка ультрадисперсных частиц, полученных при электроэрозии алюминия, в количестве до 15 г/л существенного влияния на выход металла по току при хромировании не оказывает, т. к. незначительное увеличение исследуемого параметра лежит в пределах погрешности измерений. При использовании наноразмерных продуктов электроэрозионного диспергирования графита выход хрома по току возрастает не более, чем в 1,15 раза, имея максимум при концентрации наночастиц в электролите хромирования, равный 10 г/л.

Таблица 1 – Значения величины выхода хрома по току в зависимости от состава электролита и технологических режимов металлизации

Плотность тока / температура	Выход хрома по току (%) при концентрации частиц в электролите (г/ л)					
	0,0	0,1	1,0	5,0	10,0	15,0
Электролит хромирования с добавкой наночастиц, полученных при электроискровой эрозии алюминия по схеме с вращающимся электродом						
40 А/дм ² / 45 °С	18,1	18,1	18,2	18,3	18,5	18,3
40 А/дм ² / 55 °С	16,8	16,8	16,9	17,3	17,5	17,1
50 А/дм ² / 45 °С	18,8	18,8	18,9	19,1	19,3	18,9
50 А/дм ² / 55 °С	17,4	17,4	17,5	17,7	17,8	17,7
Электролит хромирования с добавкой наночастиц, полученных при электроискровой эрозии алюминия по схеме с колеблющимся электродом						
40 А/дм ² / 45 °С	18,1	18,1	18,2	18,3	18,4	18,3
40 А/дм ² / 55 °С	16,8	16,8	16,9	17,2	17,4	16,9
50 А/дм ² / 45 °С	18,8	18,8	18,9	19,1	19,4	19,2
50 А/дм ² / 55 °С	17,4	17,4	17,5	17,7	17,7	17,6
Электролит хромирования с добавкой наночастиц, полученных при электроискровой эрозии графита по схеме с вращающимся электродом						
40 А/дм ² / 45 °С	18,1	18,1	18,5	19,3	19,8	19,3
40 А/дм ² / 55 °С	16,8	16,8	17,2	17,8	19,2	18,7
50 А/дм ² / 45 °С	18,8	18,9	19,2	19,5	20,4	19,8
50 А/дм ² / 55 °С	17,4	17,4	16,2	18,8	19,7	19,7
Электролит хромирования с добавкой наночастиц, полученных при электроискровой эрозии графита по схеме с колеблющимся электродом						
40 А/дм ² / 45 °С	18,1	18,2	18,6	19,3	20,3	19,8
40 А/дм ² / 55 °С	16,8	16,9	17,6	17,8	19,3	18,9
50 А/дм ² / 45 °С	18,8	18,9	19,2	19,6	20,5	19,9
50 А/дм ² / 55 °С	17,4	17,5	16,1	18,8	19,7	19,7

Полученные результаты позволяют утверждать, что применение наноразмерных частиц, синтезированных при электроэрозионном диспергировании алюминия, не потребуют существенной корректировки технологических режимов процесса хромирования. Использованные нами частицы могут представлять интерес как модификаторы самих покрытий. Это обусловлено тем, что различные ультрадисперсные добавки к электролитам в целом зарекомендовали себя с положительной стороны в плане формирования композиционных покрытий с улучшенными эксплуатационными характеристиками [4, 5]. Так, например, измерение микротвердости показало, что из наноэлектролитов формируются хромовые покрытия, имеющие микротвердость большую не менее чем на 7 % по

сравнению с покрытиями, полученными из электролитов без наночастиц при прочих равных условиях. Влияние же частиц, синтезированных при электроэрозионном диспергировании алюминия и графита, на другие характеристики покрытий требует дальнейшего изучения.

На рисунке 3 представлены диаграммы, характеризующие распределение гальванических хромовых покрытий по толщине на поверхности катода для образцов, полученных из стандартного электролита и наноэлектролитов, содержащих наночастицы, синтезированные методом электроэрозионного диспергирования алюминия и графита в водной среде.

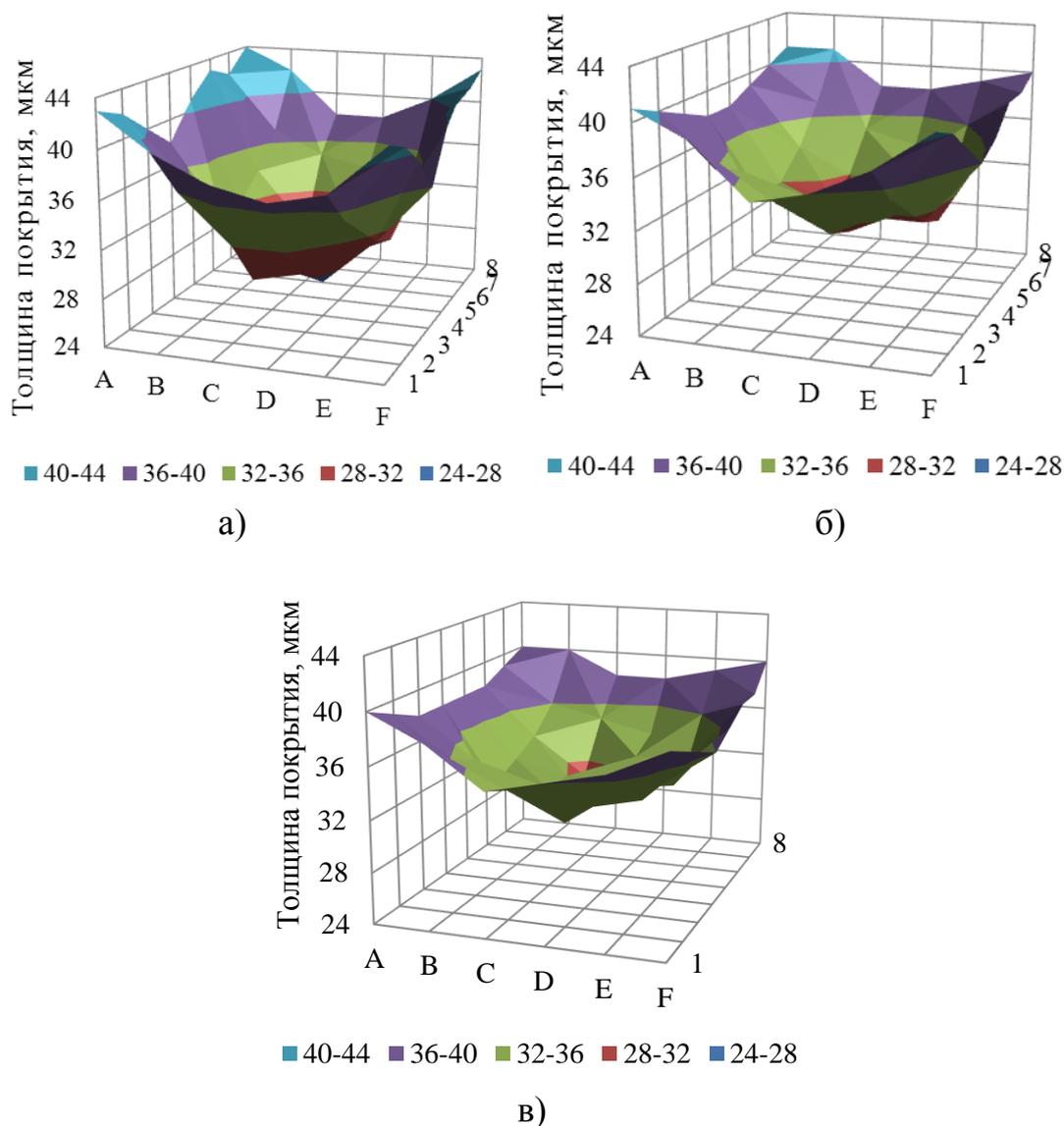


Рисунок 3 – Распределение электроосажденного хрома по толщине на поверхности образцов, полученных при нанесении покрытий из стандартного электролита (а), электролита с добавлением продуктов электроэрозионного диспергирования алюминия в концентрации 10 г/дм^3 (б) и электролита с добавлением продуктов электроэрозионного диспергирования графита в концентрации 10 г/дм^3 (в)

Установлено, что наличие в электролите наночастиц, полученных при электроэрозионном диспергировании, как алюминиевого, так и графитового полуфабриката в жидкости, приводит к снижению неравномерности хромового по-

крытия по толщине на хромируемой поверхности. Оценка расчетного параметра неравномерности осажденных покрытий, вычисленного на основе экспериментальных измерений их толщин по стандартной методике [1], показала, что хромирование стальной поверхности в наноэлектролите позволяет получать покрытия с параметром неравномерности меньшим в 2 раза, чем у стандартных покрытий. Это может свидетельствовать об увеличении рассеивающей способности электролита хромировании при добавлении в его состав наночастиц. Существенных различий по толщине покрытий для образцов, полученных из электролитов с частицами электроэрозионного синтеза по схеме с колеблющимся электродом от образцов, полученных из электролитов с частицами электроэрозионного синтеза по схеме с вращающимся электродом, выявлено не было. Из электролитов, содержащих графитовые наночастицы, осаждается более равномерное по толщине покрытие, чем из электролитов, содержащих продукты электроэрозионного разрушения алюминия.

Заключение

Таким образом, впервые получены данные о влиянии наночастиц, полученных при электроэрозионном диспергировании графита и алюминия, на характеристики электролита хромирования. Проведенные исследования показали, что одним из перспективных путей совершенствования процесса хромирования является применение наноэлектролитов, что позволяет, не меняя технологических режимов, получать более равномерные покрытия при большем выходе хрома по току.

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

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Наномодифицированные хромовые гальванические покрытия / Ю. В. Литовка [и др.] // Гальванотехника и обработка поверхности. – 2011. – № 19 (4). – С. 29–33.
2. Лещик, С. Д. Структура электролитического хрома, модифицированного дисперсными порошками / С. Д. Лещик // Материалы, технологии, инструменты. – 2000. – Т. 5, № 2. – С. 52–55.
3. Тарасевич, С. Т. Исследование влияния наночастиц в составе электролитов на катодный выход металла по току при хромировании и цинковании деталей автотранспортной техники / С. Т. Тарасевич, А. М. Плоцкая, М. С. Лещик // Инженерное и экономическое обеспечение деятельности транспорта и машиностроения: сб. материалов VI Междунар. науч. конф. молодых ученых, Гродно, 2 июня 2022 г. / ГрГУ им. Янки Купалы; редкол.: А. С. Воронцов (отв. ред.) [и др.]. – Гродно : ГрГУ им. Янки Купалы, 2022. – С. 317–321.
4. Сайфуллин, Р. С. Композиционные покрытия и материалы / Р. С. Сайфуллин // – М. : “Химия”, 1977. – 272 с.
5. 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.

БЕСПИЛОТНЫЕ ТРАНСПОРТНЫЕ СРЕДСТВА AGV: КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ, СФЕРЫ ПРИМЕНЕНИЯ, РЕКОМЕНДАЦИИ ДЛЯ МЯСОПЕРЕРАБОТКИ

Литвинович А. Н.¹, Голуб В. М.¹, Чучко А. В.²

1) Брестский государственный технический университет;

г. Брест, Республика Беларусь

2) ООО «Машиностроительное предприятие «Компо»;

г. Брест, Республика Беларусь

Введение

Транспортное средство AGV (automated guided vehicle) – это программируемый мобильный робот, который может автоматически ориентироваться в окружающей обстановке и в зависимости от этого осуществлять движение по запланированному маршруту. Применение данного робота существенно снижает трудоемкость, повышает производительность и уменьшает материальные и нематериальные издержки производства, улучшает показатели безопасности в сравнении с ручным и механизированным трудом.

1. Конструктивные особенности AGV

В соответствии с конструктивным исполнением AGV можно разделить на четыре категории:

– *AGV для единичных грузов*: имеет платформу или контейнер для перевозки поддонов, стеллажей, рулонов или многих других видов грузов. Некоторые из платформ имеют механизм подъема и опускания, а также ролики для облегчения загрузки/выгрузки перевозимого груза;

– *автоматический вилочный погрузчик*: специализируется на перевозке грузов на поддонах. Некоторые из них способны поднимать груз, при этом другие могут перевозить грузы только на уровне пола;

– *AGV-тягач* – это буксировочная машина, которая может тянуть прицепы, как правило, имеющие большую массу;

– *гибридный AGV* – это транспортное средство, которое может выполнять операции как в автоматическом, так и в ручном режимах.

Составные части и конструкции

В основном данный робот состоит из следующих основных частей (см. рисунок 1): каркаса, встроенного контроллера, электрических приводов и систем их управления, датчиков ориентации в пространстве и предупреждения об опасном сближении с препятствиями, устройств беспроводной связи, аккумуляторных батарей, приспособлений для транспортирования грузов.

Каркас транспортного средства

Каркас является основанием для крепления всех устройств AGV. Каркас должен быть разработан с учетом максимальной массы перевозимого груза. При этом каркас должен быть легким по массе для уменьшения нагрузки на приводную систему, а следовательно, для увеличения автономности работы и срока службы батарей.

Встроенный контроллер

Уровень интеллекта AGV зависит от производительности встроенного контроллера и заложенного в него программного обеспечения. Базовая схема AGV использует микроконтроллер или ПЛК для выполнения задач сбора данных с датчиков, связи с центральной системой управления и контроля над приводной системой AGV. В некоторых продвинутых схемах используется производительный ARM-чип, выполняющий операционную систему роботов (ROS) для решения этих задач. Контроллер, а также цепи управления должны быть защищены от электромагнитных помех, наводимых как внешней средой (например, излучение от систем и оборудования предприятия), так и внутренней (например, приводная система тележки).

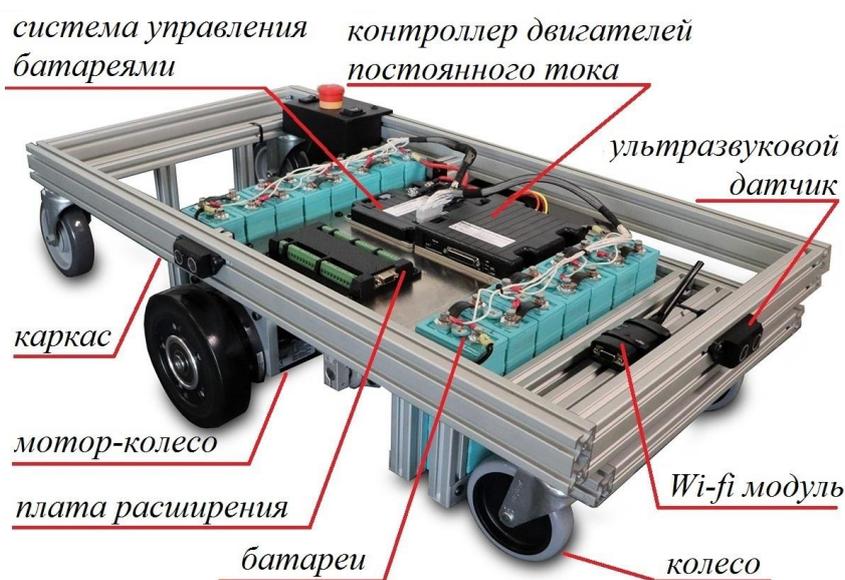


Рисунок 1 – Составные части AGV

Сенсоры и оборудование навигации

Типы датчиков, которыми оснащены AGV, зависят от подхода к навигации. Ультразвуковые датчики используются для обнаружения ближних препятствий, инфракрасные – направляющей линии, электромагнитные – электрических проводов. Камеры можно использовать для захвата меток с QR-кодом. Модули RFID можно использовать для считывания RFID-меток. Лазерный сканер используется для обнаружения окружающих препятствий и рефлекторов. Некоторые интеллектуальные схемы, использующие для навигации лазерный сканер или камеру глубины, не зависят от какого-либо оборудования навигации (рефлекторов, магнитных дорожек и др.).

Устройство связи

AGV нуждается в беспроводной связи, поэтому обычно используется WLAN с MIMO-антенной, имеющий высокий стандарт конструкции с электромагнитной совместимостью, что очень важно в случае взаимодействия тележки с центральной системой управления предприятием, технологическим оборудованием, а также пунктами сбора статистической информации. Технология 5G применяется на AGV производства Ericsson и China Mobile, обеспечивая более высокую надежность и безопасность.

Батарея

В AGV можно использовать различные типы батарей, включая свинцово-кислотные с жидким электролитом (WET), никель-кадмиевые (Ni-Cd), литий-ионные (Li-Ion) и свинцово-гелевые (GEL). В основном используется Li-Ion из-за своих малых размеров, низкого саморазряда, высокой плотности энергии. WET батарея имеет более низкую стоимость, чем Li-Ion, также она довольно тяжелая, что может быть использовано для противовеса вилочного погрузчика. Недостатки WET батареи – медленная зарядка и создание газа при ней. GEL и Li-Ion батареи заряжаются быстрее и более экологичны, не выделяют газов, но требуют обслуживания.

Двигатель

Двигатель AGV обычно устанавливается с энкодером с целью расчета и предоставления информации о пройденном пути. Типы двигателя, которые используются в AGV: мотор-редуктор постоянного тока, бесщеточный двигатель постоянного тока, серводвигатель. Эти двигатели выбираются на основе их влияния на гибкость и точность перемещения AGV.

Тип привода делится на одноколесный, дифференциальный и всенаправленный. Одноколесный привод означает, что ведущее колесо имеет функцию рулевого управления, а два ведомых колеса установлены неподвижно. Дифференциальный привод имеет два ведущих колеса, которые используют разницу скоростей для реализации поворота. Всенаправленный привод гораздо более гибкий, благодаря ему AGV способен двигаться в любом направлении без необходимости поворота.

Центральная система управления (ЦСУ)

Она отвечает за планирование задач, управление движением, планирование маршрута, автоматическую зарядку, отправку управляющих сигналов, получение данных о состоянии и некоторые другие функции. Данные о состоянии обычно включают положение в пространстве, скорость, оставшуюся емкость батареи и др. Она анализирует все эти данные, чтобы назначить AGV новые рабочие задачи, выработать наиболее разумный маршрут и последовательность действий, предотвратить несчастные случаи при столкновении, предписать AGV двигаться к зарядной станции при низком заряде батареи. В состав ЦСУ входят средства человеко-машинного интерфейса, такие как сигнальная и управляющая аппаратура, панели оператора, переключатели безопасности и аварийного останова.

Зарядная станция

Известно четыре способа организации зарядки: ручная замена батареи, автоматическая замена батареи, автоматическая зарядка и периодическая подзарядка. Метод замены батареи требует меньше времени простоя, но требует дополнительного количества батарей для замены. Автоматическая замена батареи экономически эффективнее, чем ручная, если количество AGV велико. Для автоматической зарядки требуется батарея большой емкости, потому что батарея не будет заряжаться до тех пор, пока AGV не завершит рабочий цикл в течение всего дня. Тем не менее, зарядка с коротким временем простоя разрешается для периодической подзарядки.

Методы навигации AGV

Навигация по проводам

Электромагнитная навигация – способ, при котором электрические провода с протекающим низкочастотным током закладываются под пол, для их обнаружения используется электромагнитный датчик. Скрытые провода весьма долговечны, т. к. не подвержены влиянию грязи и света. Следовательно, это надежный подход к навигации, но он целесообразен при электромагнитных помехах, также дорого изменить или расширить маршрут.

Навигация по магнитной ленте

Направление AGV по магнитной ленте, размещенной на поверхности пола. Он имеет похожий принцип с навигацией по проводам, но он гораздо проще и экономичнее в прокладке, но требует затрат на обслуживание, потому что ленту легко повредить.

Навигация по магнитным маркерам и инерционная навигация

Магнитные штыри встроены в пол в качестве контрольных точек, которые могут быть обнаружены электромагнитным датчиком. Это обычно дополняется инерциальной навигацией – автономной системой, в которой измерения акселерометров и гироскопов используются для отслеживания и ориентации AGV относительно известной точки. AGV использует энкодеры, установленные на двигателях и инерциальную навигацию для перемещения от одной точки к другой. Данный метод подходит почти для всех видов сред, кроме металлического пола.

Навигация по QR-код меткам

Метки QR-кода на полу и стеллажах могут быть захвачены камерами, установленными на AGV для навигации. AGV использует обратную связь от QR-кода, энкодера и гироскопа для определения своего местоположения, но QR-код метка недолговечна, поэтому требует обслуживания.

Оптическая навигация по дорожке

Этот метод похож на навигацию по магнитной ленте, но в нем AGV направляется по цветным линиям на полу. Камеры и функция обработки изображений необходимы для распознавания линий. Этот метод отличается высокой устойчивостью к электромагнитным помехам.

Лазерная навигация по рефлекторам (отражателям)

Рефлекторы монтируют вокруг рабочего пространства AGV. Лазерный сканер излучает лучи и принимает отраженный свет от любых препятствий, кроме отражающих панелей. Микроконтроллер на AGV может рассчитать позицию после сбора данных о расстоянии и угле пересечения нескольких отражателей. Относительно гибкий план траектории может быть легко изменен без остановки отражателей, но метод может потерять эффективность и точность, если рефлекторы будут закрыты препятствиями.

Лазерная SLAM навигация

Технология одновременной локализации и картографирования (SLAM) – это вычислительная схема построения или обновления карты неизвестного пространства с одновременным отслеживанием местоположения AGV в ее пределах. Этот подход отличается высокой гибкостью и не требует какой-либо искусственной инфраструктуры управления. Он также обычно используется вместе с инерциальной навигацией, но точность ниже, чем у лазерной навигации по рефлекторам.

2. Примеры применения беспилотных тележек

Складирование и логистика

Складская и логистическая отрасли являются самым ранним практическим использованием AGV. Примером использования систем AGV является «Амазон» – крупнейший интернет-магазин, внедривший десятки тысяч AGV под названием Kiva на 10 американских складах для погрузочно-разгрузочных работ. Другое крупное логистическое предприятие, называемое Cainiao, построило крупнейший роботизированный распределительный центр в Китае в 2018 г. 350 AGV роботов работают весь день на складе площадью 2000 м², ежедневно распределяя более 500000 посылок.

Промышленные предприятия

«Вольво» развернуло сборочную систему, в которой в качестве перевозчиков использовались 250 управляемых компьютерами AGV. В результате количество отказов при сборке и время окупаемости инвестиций значительно сократились. Также AGV применяются на заводах GM, Toyota, Chrysler, Volkswagen, АвтоВАЗ и др.

Учреждения бюджетной сферы

Гибкость является наиболее важной характеристикой в таких областях как библиотека, больница и аэропорт. Например, в больницах AGV используются для осуществления медицинского обслуживания (развоз еды, лекарств, сбор медицинских и биологических отходов).

Применение на опасных объектах

AGV используется в опасных для нахождения человека местах, например, на атомных электростанциях для обращения с радиоактивными материалами и отработанным ядерным топливом с целью безопасной и правильной их утилизации.

Применение в мясной промышленности

Наиболее ярким примером применения AGV тележек является роботизированный завод по производству сырокопченых колбас группы «Черкизово». У данного завода нет аналогов ни в России, ни в Европе. Инвестиции в проект составили 7 млрд рублей. Основное оборудование поставлено из европейских стран. Весь технологический процесс выполняют роботы. На данном заводе работает всего 200 человек вместо 700, которые обычно требуются для предприятий такого масштаба. Мощность предприятия – 80 т готовой продукции в сутки, или до 30 тыс. т в год.



Рисунок 2 – AGV тележка фирмы TescoFerrari (Италия)

Предприятие «Кашира-1» функционирует под управлением комплекса ERP и MES-системы на базе единой платформы SAP S4/HANA. Работают контуры MES, управление производством, логистикой и финансами. Также функционирует система управления техническим обслуживанием и ремонтами (на базе SAP PM). Связующим звеном между ERP-системой и оборудованием является MES-система от чешской Sabris (на базе SAP S4/HANA). Интерфейсом между MES и оборудованием выступают SCADA-системы.

AGV тележки (см. рисунок 2) применяются для перевозки колбасных рам в камеры ферментации на 4–5 дней, после чего те же самые роботы перемещают их в камеры сушки, где они находятся еще 15–20 дней. При этом роботы каждый день навешают рамы в термокамерах, чтобы взвесить их и зафиксировать изменения веса. Отслеживая уменьшение веса при сушке, можно судить о том, насколько правильно и качественно идет процесс «созревания» колбасы. Полученная роботами информация передается в ПО SAP, которое управляет производственными процессами, и, в том числе на основании этих данных, принимается решение о готовности колбасы. На «обычном» колбасном заводе решение о готовности колбасы, как правило, принимается на основании взвешивания только одной рамы: считается, что остальные рамы усредненно весят столько же.

3. Рекомендации для мясопереработки

Применение AGV тележки для автоматизации перемещения сырья, полуфабрикатов и готовой продукции между участками существенно улучшает как технологические, так и экономические показатели производства.

Беспилотное транспортное средство должно соответствовать всем требованиям санитарных норм для мясопереработки. В связи с этим для изготовления корпуса необходимо применять нержавеющей стали (например, 08X18H10) из-за частой санитарной обработки и высокой влажности. Для предотвращения попадания влаги и пыли в электрооборудование следует обеспечить степень защиты корпуса IP 68.

Рекомендуется применение дифференциального привода из-за его устойчивости, по сравнению с одноколесным. Всенаправленный привод нецелесообразен, т. к., во-первых, не требуется движение во всех направлениях без разворота, во-вторых, при движении по прямой линии у него высокое потребление энергии из-за особой конструкции колес. Также, при проектировании привода следует учитывать особенности пола цеха (материал покрытия, уклоны, характеристики сцепления колес в мокрой среде с возможным наличием фарша).

Особое внимание при проектировании беспилотной тележки следует уделять системам навигации, т. к. не все из них подходят для условий мяскокомбинатов. Например, лазерные датчики могут некорректно работать из-за большого количества оборудования из нержавеющей стали, которая, в свою очередь, может выступать в качестве рефлектора. Применение навигации по проводам и магнитной ленте нежелательно, т. к. возникают сложности при изменении маршрута и имеется риск быстрого износа ленты. Рекомендуется применение ультразвуковых датчиков, RFID-модулей и оптической навигации по дорожке.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Moshayedi, A. J. AGV (automated guided vehicle) robot: Mission and obstacles in design and performance / A. J. Moshayedi, L. Jinsong, L. Liao // Journal of

Simulation and Analysis Novel Technologies in Mechanical Engineering. – 2019. – Vol. 12, № 4. – P. 5–18.

2. Коноваленко, Л. Ю. Применение робототехники в мясной промышленности: аналит. обзор / Л. Ю. Коноваленко, Н. П. Мишуков, М. А. Никитина. – М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2021. – 80 с.

3. Первый в российской мясопереработке завод-робот [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://meat-expert.ru/news/2787-pervyyu-v-rossiyskoy-myasopererabotke-zavod-robot-video>. – Дата доступа: 25.09.2022.

УДК 621.833.61

ИНЖЕНЕРНЫЕ РАСЧЁТЫ ЗУБЧАТЫХ КОЛЁС С ПОМОЩЬЮ SOLIDWORKS SIMULATION

Логвин А. И., Ковпанько В. А., Онысько С. Р., Бочарова Н. В.

Брестский государственный технический университет

г. Брест, Республика Беларусь

Современные системы инженерного анализа (совокупность исследований) – предназначены для проверки работоспособности проектируемых изделий, различных эксплуатационных характеристик (анализа частоты, расчет устойчивости, усталости, испытаний на ударную нагрузку, анализа оптимизации и др.), что позволяет с минимальными затратами времени сопоставить ряд различных альтернативных конструкторских решений [1].

В данной работе объектом исследования является твердотельная параметрическая модель механической системы «Планетарная передача» (рисунок 1). Это механическая передача вращательного движения, которая за счет своей конструкции способна в пределах одной геометрической оси вращения изменять, складывать и раскладывать подводимые угловые скорости и/или крутящий момент.

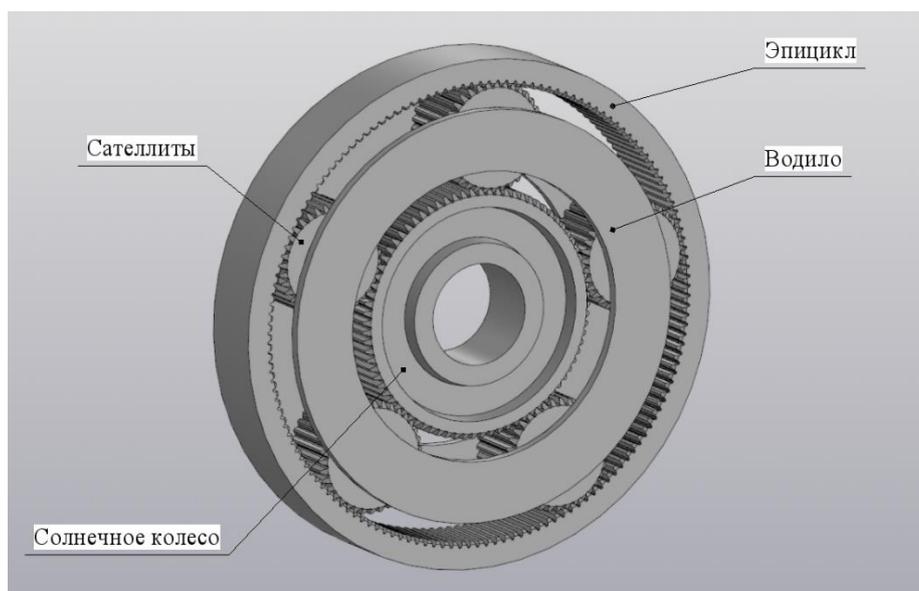


Рисунок 1 – Сборочная модель планетарной передачи

Основными звеньями планетарной зубчатой передачи являются:

- центральные зубчатые колеса, оси которых неподвижны;
- сателлиты (зубчатые колеса с перемещаемыми осями вращения);
- водило (звено в котором установлены оси сателлитов).

Инженерный анализ производится при помощи инструментов программного комплекса *SolidWorks*, который содержит интегрированный модуль *Simulation* для разного рода исследований. Объединение деталей в механическую систему выполнялось, соблюдая все правила условий сопряжения сборки. Для механического зацепления зубьев использовался дополнительный инструмент программы «*Механические сопряжения → Редуктор*», необходимый для соединения деталей с элементами зацепления и передачи крутящего момента между шестернями.

Для оценки годности детали были выбраны критерии: прочность, коэффициент запаса прочности; сопротивление усталости.

Прочность – способность материала (образца, детали, элемента конструкции) не разрушаясь сопротивляться действию внешних сил. Целью расчета является определение размеров деталей или величины внешних нагрузок.

Коэффициент запаса прочности (FOS) – величина, показывающая способность конструкции выдерживать прилагаемые к ней нагрузки выше расчетных. Наличие запаса прочности обеспечивает дополнительную надёжность конструкции, чтобы избежать повреждений и разрушения в случае возможных ошибок проектирования, изготовления или эксплуатации.

Для расчета запаса прочности используется критерий максимального напряжения по Мизесу, определяющий момент, когда пластичный материал начинает растягиваться и эквивалентное напряжение достигает предела текучести.

Для оценки несущей способности деталей, после сборки механизма в *SolidWorks*, для модели выполнялись проверочные расчеты, определялся коэффициент запаса прочности по *von Mises (FOS)*, по результатам которого можно оценить эксплуатационные качества шестерни (зубьев шестерни) в зоне контакта [2].

Основным материалом зубчатых колес является сталь, подвергнутая термической обработке. Колеса изготавливают из кованных и штампованных заготовок или применяют круглый прокат. Для этого используют среднеуглеродистые и низкоуглеродистые стали [3].

Для статического расчета деталей планетарной передачи в *SolidWorks* был выбран материал – сталь 40ХН и определены условия закрепления элементов, а также приложение внешней нагрузки: одна шестерня фиксируется, к другой шестерне применяется крепление «*зафиксированный шарнир*», для того чтобы, вращаясь, она испытывала сопротивление от зафиксированной шестерни. Внешняя нагрузка на подвижную шестерню передавалась в виде вращающего момента.

От параметра «*сетка*» зависит насколько точно можно получить результаты расчета. Для построения модели применялась «*сетка*» высокой точности и с улучшением ее в месте зацепления зубьев, для получения максимально точных результатов исследования.

Результаты напряжённо-деформированного состояния зубчатого зацепления «сателлит» – «солнечное колесо», «эпицикл» – «сателлит», представлены на рисунке 2 и рисунке 3 соответственно.

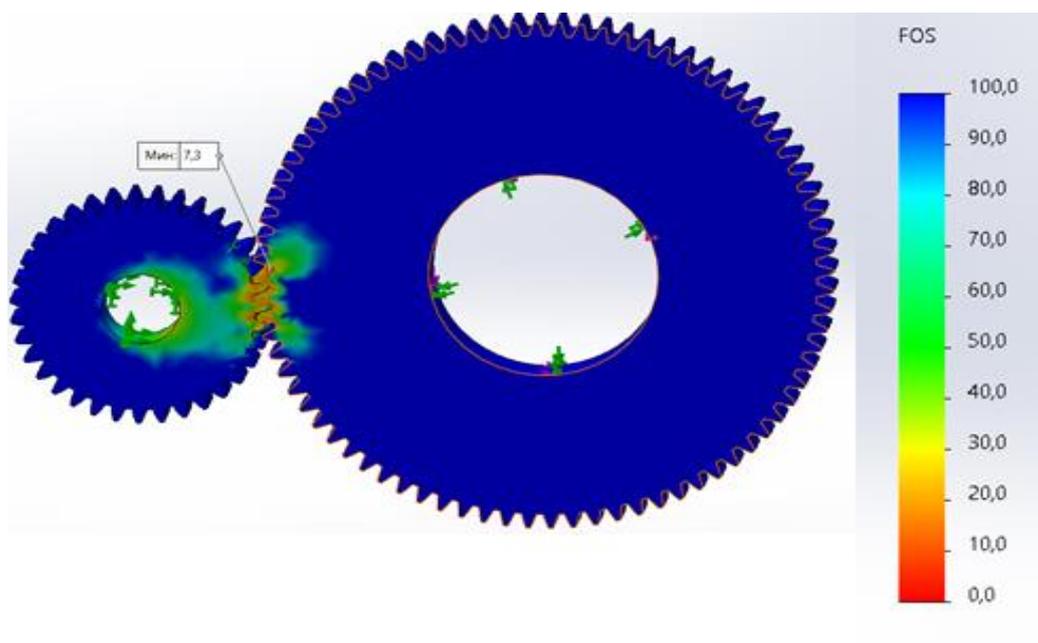


Рисунок 2 – Статический расчет напряжённо-деформированного состояния «сателлит» – «солнечное колесо»

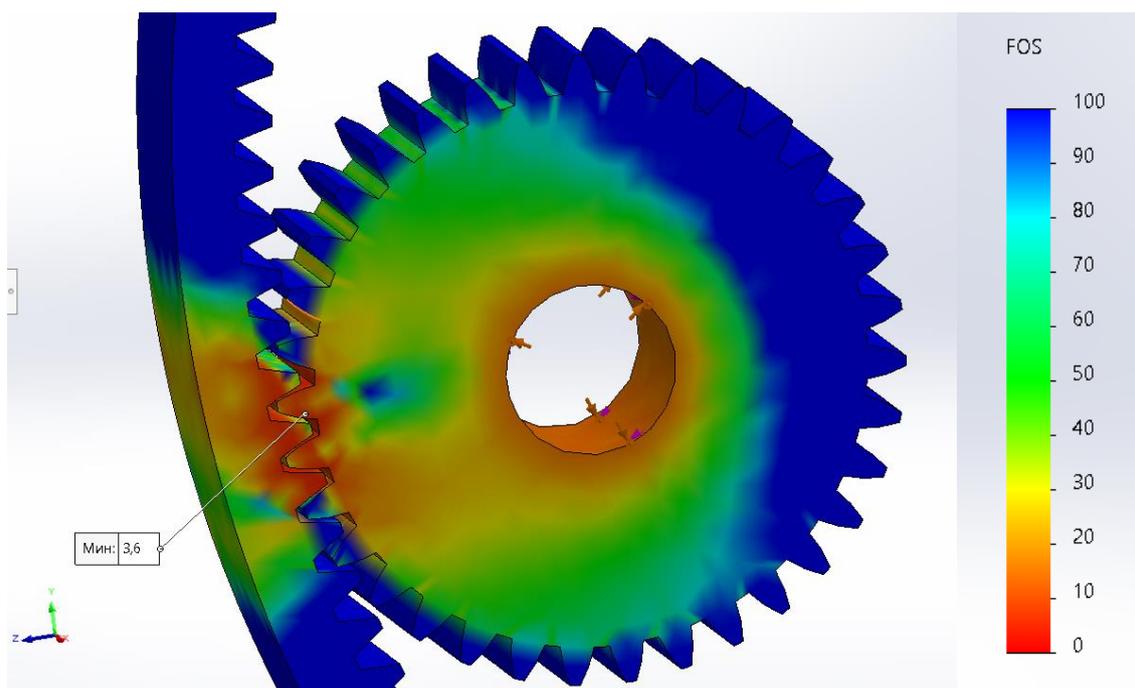


Рисунок 3 – Статический расчет напряжённо-деформированного состояния «эпицикл» – «сателлит»

Размеры и массу зубчатых колес планетарных передач определяют с помощью следующих расчетов: на контактную прочность активных поверхностей зубьев, на изгиб зубьев [4].

Для получения результатов долговечности отдельных частей механизма было выполнено усталостное исследование, зубчатого зацепления «сателлит» – «солнечное колесо» (рисунок 4) и «эпицикл» – «сателлит» (рисунок 5).

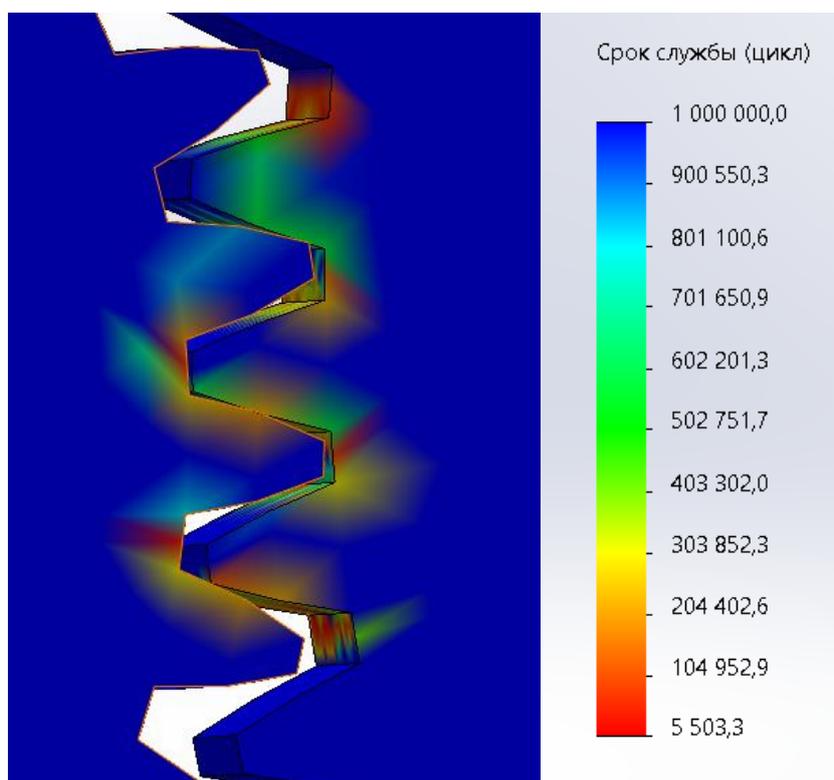


Рисунок 4 – Усталостное исследование «сателлит» – «солнечное колесо»

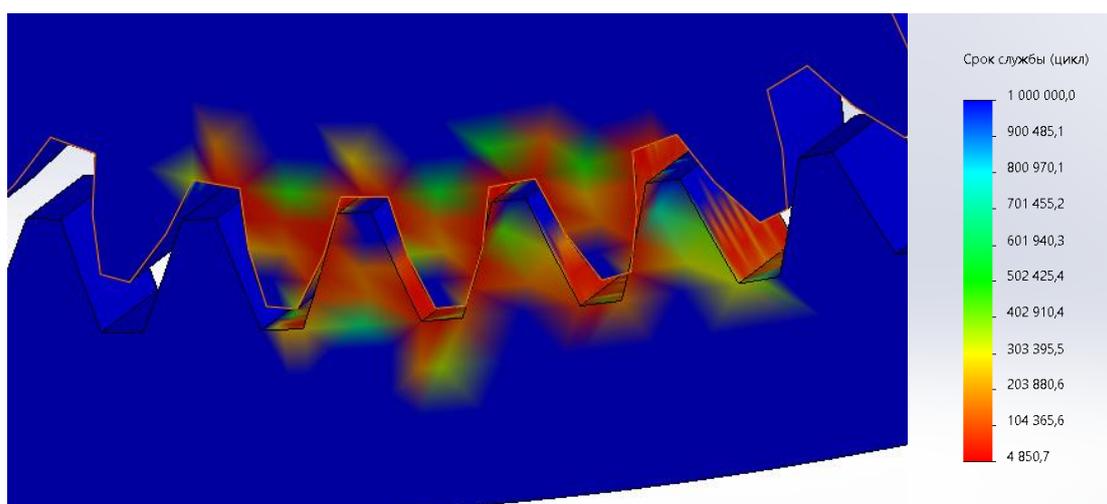


Рисунок 5 – Усталостное исследование «эпицикл» – «сателлит»

В ходе выполнения виртуальных экспериментов были получены напряжённо-деформированное состояние зубчатого зацепления элементов планетарной передачи, усталостный расчет для получения срока службы. Применение данных методов расчета статической прочности на этапе проектных работ помогает конструктору увидеть наиболее нагруженные места, минимизировать ошибки проектирования и снизить трудозатраты, более рационально подойти к конструированию. Также использование модуля *SolidWorks Simulation*, встроенного в *SolidWorks*, позволяет произвести полный комплекс всех необходимых расчетов прочности, а также спроектировать надежный узел с минимальными массово-экономическими затратами в производстве и эксплуатации.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Лукинских, С. В. Компьютерное моделирование и инженерный анализ в конструкторско-технологической подготовке производства : учебное пособие / С. В. Лукинских; М-во науки и высш. обр. РФ. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2020. – 168 с.
2. Водопьянов, В. И. Курс сопротивления материалов с примерами и задачами : учеб. пособие / А. Н. Савкин, О. В. Кондратьев. – ВолгГТУ : Волгоград, 2012. – 136 с.
3. Кокорев, И. А. Курс деталей машин: учеб. пособие / И. А. Кокорев, В. Н. Горелов. – Самара : Самар. гос. техн. ун-т, 2017. – 287 с.
4. Кудрявцев, В. Н. Планетарные передачи / В. Н. Кудрявцев. – Справочник. Издание 2-е, перераб. и доп. – М., 1966 – 536 с.

УДК 621.91

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ НА СОВРЕМЕННОМ ЭТАПЕ РАЗВИТИЯ ОТРАСЛИ

Мартиновская О. В.¹, Жорник В. И.²

- 1) *Брестский государственный технический университет,
г. Брест, Республика Беларусь*
- 2) *Объединённый институт машиностроения НАН Беларуси,
г. Минск, Республика Беларусь*

Машиностроение в значительной степени определяет состояние научно-технического и производственного потенциала ведущих отраслей мировой экономики, стремление поддерживать предприятиями конкурентоспособность выпускаемой продукции стимулирует непрерывное развитие машиностроительной отрасли. С этой целью ведутся работы как над повышением работоспособности оборудования, его долговечности и безотказности, так и над снижением себестоимости производства, что напрямую зависит от экономии трудовых, материальных и энергетических ресурсов, затрачиваемых на выпуск продукции. Стремясь повысить конкурентоспособность машин, производители увеличивают скоростные и силовые возможности агрегатов, что неизбежно влечёт за собой ужесточение требований к прочности и надёжности составляющих их деталей и узлов. Увеличение ресурса наиболее ответственных элементов механизмов можно обеспечить за счёт разработки новых технологических процессов их изготовления, включая операции, позволяющие улучшить качество рабочих поверхностей деталей. С ростом требований к точности и качеству получаемых поверхностей более остро встают задачи совершенствования технологии чистовой и финишной обработки.

Работа над повышением эффективности производства также заставляет непрерывно улучшать существующие технологии и рассматривать новые способы обработки деталей. Особенно актуальным это становится, когда перед предприятием встаёт вопрос о необходимости перевооружения производства.

Серьёзное развитие получили методы формообразования, предполагающие получение заготовок, практически не требующих механической обработки. Однако, несмотря на это, именно механическая обработка является наиболее распространённой и всё ещё перспективной технологией, особенно незаменимой на этапе окончательного придания формы и качества ответственным поверхностям. По сравнению с другими существующими методами получения и обработки деталей (аддитивными, лазерными, термоэлектрическими, электрохимическими, ультразвуковыми и пр.), механическая обработка более универсальна, производительна, менее энергоёмка и легко поддаётся автоматизации [1]. Для повышения производительности механической обработки, наиболее перспективным направлением является оснащение производства оборудованием, позволяющим проводить высокоскоростную обработку с частотой вращения шпинделя 12000...40000 мин⁻¹ при скоростях резания до 3000...5000 м/мин.

Лезвийная обработка материала на всех стадиях технологического процесса была и остаётся наиболее оптимальной с точки зрения энергозатрат и производительности. К примеру, высокие требования к точности и качеству изготовления отдельных поверхностей валов традиционно заставляют предусматривать в технологическом процессе операции шлифования, и, не в последнюю очередь, это связано с инерционностью мышления. Однако высокая стоимость шлифовального оборудования и инструмента, продолжительность основного и вспомогательного времени шлифовальных операций делают этот вид обработки сравнительно дорогостоящим [2]. Что касается качества получаемых поверхностей, то высокие температуры в зоне резания при шлифовании могут приводить к изменению структуры, а значит и физико-механических свойств обработанной поверхности. При шлифовании закалённых сталей на поверхности возможно возникновение прижогов, микро- и макротрещин, шаржирование, царапин, вкраплений разрушившегося абразива [3, 4]. Все эти недостатки отсутствуют при использовании в качестве финишной обработки «твёрдого точения». При этом качество поверхности при использовании высокоскоростной обработки (ВСО) сравнимо с качеством поверхности после шлифования, а удельный объём стружки, снимаемый в единицу времени, увеличивается от трёх до пяти раз [1]. К тому же после точения в обработанном поверхностном слое возникают благоприятные сжимающие остаточные напряжения в отличие от вредных растягивающих, остающихся после шлифования.

За отказ от шлифования выступают такие аргументы, как необходимость использования СОЖ и утилизации образующегося шлама. СОЖ распыляется в воздухе, испаряется, присутствует в шлеме, чем оказывает негативное влияние как на окружающую среду, так и на дыхательную систему человека, его кожные покровы [5]. Применение «твёрдого точения» в большинстве случаев не требует использования СОЖ, а стружка после точения либо полностью сгорает в процессе резания, т. к. 80 % теплоты отводится в стружку, либо успешно подвергается вторичной переработке, что повышает экологическую безопасность производства.

Внедрение ВСО способствует высвобождению до 30 % станков, позволяет одновременно с сохранением точностных и прочностных характеристик деталей заменить шлифование лезвийной обработкой, благодаря чему сократить

номенклатуру используемого оборудования и уменьшить машинный парк предприятия. Затраты на оборудование, обслуживающий персонал и занимаемые площади снижаются. Однако при этом возникает необходимость перехода на современный режущий инструмент, материал и геометрия которого отвечали бы требованиям новых технологий и производств. Возрастают требования к ресурсу инструмента, главной задачей является увеличение его износостойкости и вибростойкости [6].

Существующие современные направления в развитии режущего инструмента и инструментальных систем значительно изменили рынок применяемых инструментальных материалов. На высокотехнологичных машиностроительных предприятиях за последние десятилетия соотношение используемых инструментальных материалов, применяемых для механической обработки, поменялось в пользу твёрдых сплавов, они занимают около 60 %, всех инструментальных материалов, вытеснив быстрорежущие стали. Также выросла доля инструментов, изготовленных из керамики и на основе сверхтвёрдых материалов (СТМ), их общая доля приближается к 15 %. Однако твердосплавный инструмент не решает проблемы замены шлифования использованием высокоскоростной обработки.



Рисунок 1 – Пластины из твёрдого сплава, фрезы и резцы, оснащённые многогранными твёрдосплавными пластинами

Из-за низкой химической стабильности между твердым сплавом и обрабатываемым материалом использовать твердосплавные пластины для «твёрдого точения» не рекомендуется [7]. Высокая скорость резания, повышение температуры в зоне контакта приводят к абразивно-окислительному изнашиванию, переходящему в диффузионную стадию, что резко снижает стойкость инструмента [6]. С целью увеличения стойкости твёрдых сплавов производители

предлагают широкий ассортимент инструментальных пластин, имеющих одно- и многослойные покрытия. Твердые сплавы без покрытия составляют весьма незначительную часть от всего ассортимента инструментальных материалов.

Мировой тенденцией в совершенствовании режущего инструмента, обеспечивающего ВСО материалов твёрдостью 45–62 HRC, является создание и применение уникальных материалов на основе СТМ, к которым относятся алмаз и кубический нитрид бора (сBN). Несмотря на то, что первые успешные опыты по синтезу СТМ проводились ещё в середине XX века, а в 80-е годы количество разработанных марок композитов было значительно, именно в последнее время всё больше предприятий-изготовителей обращаются к СТМ, используя их в качестве лезвийного инструмента. Причиной этого служит разработка и более широкое внедрение станков, обеспечивающих максимально эффективное использование инструмента из СТМ.

Кубический нитрид бора – искусственно синтезированный материал, приближающийся по своим характеристикам к алмазу, а по некоторым, в частности, по термостойкости, превосходящий его. Он состоит из атомов азота и бора, расположенных в такой же пространственной конфигурации, что и атомы углерода в алмазе. Важнейшие свойства сBN, определяющие интерес к нему как к инструментальному материалу:

- высокая твердость (от 3000 до 5000 HV);
- низкий коэффициент трения (от 0,1 до 0,3);
- высокая термостойкость (достигает 1200–1350 °C);
- высокая химическая стойкость (низкая интенсивность взаимодействия с элементами обрабатываемого материала Fe, Cr, Ni, Co, Ti, Mo, W);
- высокая стойкость к окислению (химически пассивный материал);
- высокая теплопроводность (близкая к 800 Вт/(м·К));
- высокая износостойкость композиционных материалов на его основе (в 30–50 раз больше, чем у твердых сплавов).

Уникальная комбинация свойств сBN позволяет использовать его в качестве режущего инструмента при обработке высоколегированных и закалённых сталей, чугунов, твердых сплавов, других труднообрабатываемых материалов и применять в условиях интенсивных истирающих воздействий. Термодинамические особенности полиморфизма нитрида бора обусловили создание большого количества материалов на основе его плотных модификаций с использованием различных технологий получения исходного материала.

Наибольшей твёрдостью обладают монокристаллы сBN, получаемые прямой перестройкой гексагональной кристаллической решётки в кубическую. Однако для лезвийного инструмента монокристаллы практически не используются в связи небольшими размерами и высокой стоимостью; они применяются в виде порошков для операций шлифования и полирования, а также в качестве сырья для получения поликристаллов. Поликристаллические сверхтвёрдые материалы (ПСТМ) в большинстве случаев получают спеканием мелкодисперсных порошков сBN и вюрцитного нитрида бора (wBN) в условиях термобарического воздействия либо методом фазового превращения гексагонального нитрида бора в кубический (графитоподобного в алмазоподобный), либо частичного или полного превращением wBN в сBN. Созданные материалы могут

содержать частицы СТМ как в связующей матрице, так и спеченные в поликристаллические блоки без добавок связующих веществ.

Пластинами из поликристаллов cBN оснащаются преимущественно резцы и фрезы, используемые в тяжёлых эксплуатационных условиях. Наиболее известные зарубежные компании, занимающиеся производством и реализацией инструментов на основе cBN, – Sandvik, TaeguTec, Seco, SCAR, Sumitomo, Tungaloy, Kyocera, Kennametal, Mitsubishi. Работы над совершенствованием существующих и созданием новых материалов на основе cBN продолжаются в научных лабораториях таких стран, как Беларусь, Россия, Украина, Япония, Швеция, Израиль и др.

Наиболее известными материалами, созданными на основе кубического или вюрциподобного нитрида бора, являются композиты: эльбор-Р (композит 01), белбор (композит 02), исмит (композит 03), КНБ (композит 05), ПНТБ (композит 09), гексанит-Р (композит 10), киборит (композит 11). Несмотря на разнообразие композитов, каждый материал имеет наилучшие характеристики эксплуатации для обработки конкретных материалов, при использовании определённых режимов и условий работы, и поэтому они не конкурируют друг с другом [8]. Если рассмотреть их состав, а именно наличие основной фазы, то можно убедиться, что именно она в определяющей степени влияет на их твёрдость.

Таблица 1 – Состав и твёрдость материалов на основе cBN

Материал	Количество cBN, %	Прочие фазы, %	Твёрдость по Кнупу, ГПа
композит 01	98	-	37
композит 05	75	25, Al ₂ O ₃	18,8
композит 10	95	5, wBN	30
киборит-1	97	AlB ₁₂ , AlN	34

Полученные ПСТМ различаются как размером, структурой и свойствами используемых зерен VN, так и применяемыми связующими материалами (металлы, карбиды, нитриды, карбонитриды, оксиды и др.) и их свойствами: видом, дисперсностью и химической активностью.

Работы по синтезу материалов на основе cBN направлены на расширение возможности применения СТМ, которое на данном этапе сдерживается его относительно высокой стоимостью, сложностью изготовления и узким диапазоном режимов резания, актуальных для конкретных пар материалов заготовка-инструмент. В зависимости от условий работы инструмента ставится задача оптимизировать у композита те или иные стойкостные характеристики, важные для эксплуатации в конкретных условиях. При черновой обработке, при обработке с ударами от материала режущего инструмента, требуется в большей мере трещиностойкость, которая обеспечивает уменьшение сколов режущей кромки. При финишной обработке на первое место выступает прогрессирующий износ по задней поверхности инструмента, поэтому задача стоит в увеличении твёрдости инструментального материала.

Для управления микроструктурой композита, с целью получения высокопрочных трещиностойких материалов, спекание порошков VN проводят с применением различных активирующих добавок. Используемое в аппаратах давле-

ние варьируется от 4 до 10 ГПа, а температура, необходимая для протекания процесса, находится в диапазоне 1300–2400 °С. Продолжительность протекания процесса спекания составляет 15–60 секунд и оказывает непосредственное влияние на размер зёрен частиц cBN.

Поиск альтернативных технологических решений, позволяющих повысить качество получаемых инструментальных материалов, привёл к созданию ряда новых материалов на основе кубического нитрида бора. На постсоветском пространстве наиболее известны исследования, проводившиеся в Объединённом институте машиностроения НАН Беларуси (г. Минск), в Научно-практическом центре НАН Беларуси по материаловедению (г. Минск), Институте сверхтвёрдых материалов им. В. Н. Бакуля НАН Украины (г. Киев). Созданы новые материалы, например, композиты систем «cBN – AlB₁₂, AlN», «cBN – Si₃N₄» содержащие cBN ≈ 97 % (ИСМ, Украина); «cBN – wBN - AlB₂/AlN» содержание cBN ≈ 80 %, «PcBN – Al» cBN ≈ 95 % (ОИМ НАН Беларуси) [9–11]. Материалы системы VN-Al-Ti исследовались в Ташкентском транспортном университете (Республика Узбекистан) [12].

В лаборатории наноструктурных и сверхтвёрдых материалов Объединённого института машиностроения НАН Беларуси ведутся исследования в нескольких направлениях синтеза плотных форм VN. Одно из направлений – разновидность метода получения cBN с применением каталитически активных добавок, разработана технология синтеза ПСТМ на основе cBN из порошка гексагонального VN, модифицированного алюминием. В результате предварительной химико-термической обработки алюминий осаждается на поверхности частиц VN и в условиях высоких давлений и температур активирует фазовое превращение гексагонального VN в кубический. Полученный материал обладает достаточно высокими твердостью (35–38,5 ГПа) и трещиностойкостью (11,5–12,9 МПа·м^{1/2}) и перспективен для чистовой лезвийной обработки.

Другой разработкой Объединённого института машиностроения НАН Беларуси является метод спекания под давлением субмикророшков cBN каталитического синтеза размерами 0,3–0,5 мкм, а также wBN взрывного синтеза с размерами частиц в пределах 0,3–5 мкм. С целью образования на зёрнах порошков cBN и wBN диффузионного покрытия, а также удаления с их поверхности влаги и кислородсодержащих соединений порошок cBN перед спеканием подвергают высокотемпературному отжигу в парах галогенидов тугоплавких металлов (W, Ti) и алюминия. Полученные поликристаллы состоят из зерен размерами преимущественно 0,5–0,8 мкм, самыми крупными являются зёрна cBN 1 мкм. Полученные по разработанной методике материалы имеют более низкую пористость и более высокую механическую прочность в сравнении с поликристаллами, синтезированными из порошков без специального покрытия [9, 13]. Материал предназначен для чистовой обработки закаленных сталей и износостойких покрытий.

Наличие экспериментального отечественного производства сверхтвёрдых инструментальных материалов на основе cBN является стимулом для развития инновационных высокопроизводительных технологических процессов механической обработки, способствующих дальнейшему развитию машиностроительной промышленности РБ. Новые синтезированные материалы на основе cBN,

требуют детального исследования и определения оптимальных условий их применения, разработки рекомендаций по рациональным режимам резания, определения перспективных направлений создания режущих инструментов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Корнеев, В. М. Повышение качества изделий на этапе процесса механической обработки, В. М. Корнеева, С. С. Корнеев / Журнал «Технология машиностроения». – № 10. – 2014. – С. 16–20.

2. Солоненко, В. Г. Резание металлов и режущие инструменты: уч. пособие / М. : В. Г. Солоненко, А. А. Рыжкин. Высшая школа, 2008. – 414 с.

3. Рогов, В. А. Высокоскоростная обработка закалённых заготовок / В. А. Рогов. – Журнал Технология машиностроения. – 2014. – № 3. – С. 16–19.

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/KhPI-Press/20359/1/STvMS_2010_5_Zubar_Lezviynaya.pdf.

5. 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.

6. Шелег, В. К. Анализ и выбор рациональных режимов резания твердосплавным инструментом при точении валов В. К. Шелег, Д. Г. Шатуров, Г. Ф. Шатуров. // Наука и техника. – 2018. – Т. 17, № 1. – С. 14–20.

7. Макаров, А. Д. Оптимизация процессов резания / А. Д. Макаров. – Москва: Машиностроение, 1976. – 278 с.

8. 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.

9. Синтез и применение наноструктурных сверхтвёрдых материалов инструментального назначения, П. А. Витязь, В. Т. Сенють. – Минск : Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. – 2015. – № 3: серія «Фізіка-тэхнічных навук». – С.60–76.

10. Клименко, С. А. Технологические возможности инструментов оснащённых композитами на основе кубического нитрида бора, С. А. Клименко, М. Ю. Копейкина, А. О. Чумак // Журнал «Сучасні технології в машинобудуванні». – 2017. – вип. 12. – С. 54–60.

11. Получение сверхтвёрдого композита на основе cBN с повышенной трещиностойкостью конверсионным спеканием под высоким давлением Урбанович В. С. [и др.] // Актуальные проблемы прочности: материалы Международной научной конференции. – Минск : УП «ИВЦ Минфина», 2022. – С. 378–380.

12. Режущий композиционный инструментальный материал на основе связи соединения системы В-N-Ti-AL для чистовой обточки железнодорожных деталей / Ш. З. Файзиев [и др.] // Universum: технические науки: электрон. научн. журн. – 2021. – № 3 (84).

13. Витязь П.А. Спекание наноструктурных композитов на основе детонационных алмазов и плотных фаз VN, П. А. Витязь [и др.] // Процеси механічної обробки в машинобудуванні выпуск: сб. науч. тр. – Житомир : ЖГТУ, 2012. – Вып. 13. – С. 40–52.

МЕТОДИКА ИСПЫТАНИЙ НОВЫХ СВЕРХТВЁРДЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ cBN В КАЧЕСТВЕ ЛЕЗВИЙНОГО ИНСТРУМЕНТА ДЛЯ ЧИСТОВОЙ ОБРАБОТКИ

*Мартиновская О. В., Горбунов В. П., Нерода М. В.
Брестский государственный технический университет,
Республика Беларусь*

Использование лезвийного инструмента на основе кубического нитрида бора (cBN) на чистовых операциях, взамен обработки абразивными кругами, показало достаточно высокую эффективность его использования. Это в первую очередь достигается за счет повышения производительности обработки, уменьшения затрат на инструмент и оборудование. Однако анализ существующих литературных источников показывает, что большинство из них посвящены технологиям получения, составу и свойствам материалов, изготовленных на основе cBN, и лишь незначительная часть научных публикаций рассматривает режущие свойства инструментального материала из cBN и их оптимизацию.

Эффективность процесса резания оценивается как качественными характеристиками обработанной поверхности (волнистость, шероховатость), свойствами поверхностного слоя, так и стойкостью режущего инструмента. Обработка инструментом из поликристаллического кубического нитрида бора тонким точением обеспечивает высокую точность полученных поверхностей при низкой шероховатости. Сущность тонкого точения, которое в литературе при обработке cBN называется «твёрдым точением», заключается в снятии стружки очень малого сечения при высоких скоростях резания. Благодаря чему между деталью и инструментом возникает локальный кратковременный контакт, не позволяющий развиваться в соприкасающихся поверхностях серьёзным изменениям. При этом использование высокоскоростной обработки (ВСО) в качестве чистовой возможно только на станках высокой точности и жесткости.

Целью исследований, проводимых на кафедре машиностроения БрГТУ, является изучение режущих свойств вставок из сверхтвёрдых материалов на основе cBN: cBN-wBN-AlB₂/AlN и cBN-Al, синтезированных в лаборатории наноструктурных и сверхтвёрдых материалов Объединенного института машиностроения НАН Беларуси. В качестве деталей для исследования процесса токарной обработки выбраны валы, т. к. в машиностроении к понятию валы относят целую группу деталей машин (гильзы, штоки, пальцы...) образованных наружными продолжительными поверхностями вращения. Вследствие нагружения подобных деталей в процессе работы они испытывают сложные деформации на кручение, растяжение, изгиб. Поэтому основными требованиями к материалу валов являются прочность и твёрдость поверхностного слоя, спо-

собного сопротивляться интенсивному износу. Наиболее распространённым материалом на производстве для валов является сталь марок 35, 35X, 40, 40X, 45, 45X подвергнутая поверхностному упрочнению.

В настоящей статье представлена методика проведения экспериментальных исследований направленных на выявление возможности замены шлифования штоков гидроцилиндров «твёрдым точением» с использованием пластин из указанного материала. Эксперименты проводятся с целью установления влияния технологических факторов на шероховатость обработанной поверхности и стойкость инструмента.

Для изучения режущих свойств исследуемых материалов на основе cBN образцы для обтачивания выполнены в виде валов, материал – сталь 45, подвергнутая закалке ТВЧ, полученная твёрдость поверхностного слоя 45...50 HRC. Размеры образцов: диаметр 40...45 мм, длина обрабатываемой части 300 мм. На производстве для получения качества поверхности по 9 качеству и шероховатости поверхности $Ra = 0,63$ и $0,32$ в технологическом процессе предусматривается шлифование за два прохода, при этом снимается суммарный припуск $0,2$ мм по всей длине заготовки.

Однако шлифование сопровождается высокими температурами в зоне резания и может приводить к изменению структуры материала, возникновению прижогов, микро- и макротрещин, царапин, вкраплений разрушившегося абразива [1], что недопустимо для поверхностей работающих при циклическом нагружении. К тому же шлифование длинных поверхностей приводит к интенсивному износу шлифовального круга, из-за чего возникает отклонение обработанной поверхности от цилиндричности. Заменяя шлифование тонким точением, мы устраняем возможность появления выше указанных недостатков благодаря тому, что зона контакта резца с поверхностью детали много меньше, чем шлифовального круга, температура в точке контакта резца и заготовки достигает 1200°C , однако, на глубине 10 мкм она не превышает 100°C [1]. На рабочих поверхностях инструмента образуется тонкий жидкий слой из соединений, имеющих более низкую температуру плавления, в результате чего контакт инструмента со стружкой и обрабатываемой деталью происходит через слой жидкой фазы, обуславливающей наличие жидкостного трения [2], поэтому ВСО возможна без применения смазочно-охлаждающих технологических сред.

Анализ литературных источников показал, что геометрия режущей части вставок из сверхтвёрдых материалов на основе cBN, которыми оснащены резцы, работающие на больших скоростях, должна обеспечивать как прочность вершины, так и прочность режущих кромок резца. Для этого рекомендуется при обработке сталей переднему углу придать отрицательное значение от -5° до -10° , сопряжение между главной и вспомогательной режущими кромками выполнять с радиусом $0,1...0,6$ мм или в виде прямолинейной кромки длиной $0,3...0,8$ мм, а задний угол $8...12^{\circ}$. Для увеличения прочности вершины резца углы в плане рекомендуется принимать 45° и 20° [2].



а)

б)

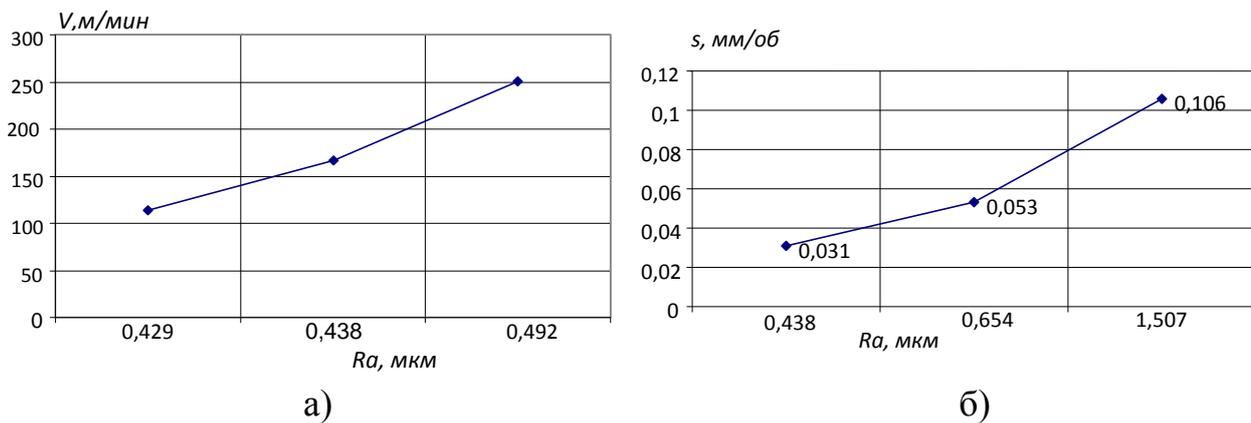
а) вставки из cBN–Al изготовленные в объединенном институте машиностроения НАН Беларуси; б) резец с напаянной вставкой из cBN–Al

Рисунок 1 – Инструмент на основе VN

В нашем случае инструмент для испытаний представляет собой прямой проходной резец со вставкой из cBN–Al (рисунок 1а), закреплённой на державке с помощью пайки (рисунок 1б). Рабочая поверхность заточена по переднему углу $\gamma = -5^\circ$; заднему – $\alpha = 10^\circ$, радиус при вершине $r = 0,6$ мм, углы в плане выполнены $\phi = 45^\circ$, $\phi_1 = 15^\circ$. Следуя рекомендациям, для точения термообработанных сталей на инструменте выполнена упрочняющая фаска шириной $h = 0,2$ мм.

С целью установления области экспериментирования и выявления степени влияния режимов точения на шероховатость поверхности были проведёны предварительные эксперименты, которые показали, что с увеличением подачи и скорости резания шероховатость увеличивается (рисунок 2), а изменение глубины резания в пределах $t = 0,025 \dots 0,1$ мм, практически не сказывается на величине шероховатости. Выбор диапазона изменения параметров проведён в соответствии с научными публикациями [3–5] и согласно рекомендациям инструментальных фирм Sandvik, Seco. Диапазон подач изменялся в пределах $S = 0,031 \dots 0,106$ мм/об, скорость резания – $V = 114 \dots 251$ м/мин, глубина резания – $t = 0,025 \dots 0,075$ мм. На рисунке 2 показаны зависимости шероховатости обработанной поверхности от изменения скорости резания и подачи, при постоянной глубине резания 0,05 мм.

Для контроля шероховатости поверхности использовали портативный измеритель шероховатости TR200 (профилометр), выпущенный компанией Time Group Inc, сертифицированный Госстандартом РФ и внесенный в Государственный реестр средств измерений.



а) скорости резания, при постоянных $t = 0,05$ мм, $s = 0,031$ мм/об;

б) подачи при постоянных $t = 0,05$ мм, $V = 167$ м/мин

Рисунок 2 – Зависимости шероховатости обработанной поверхности

На увеличение шероховатости в процессе обработки будет влиять интенсивность износа инструмента. Максимально допустимый износ по задней поверхности при чистовой обработке не должен превышать $h_z = 0,25$ мм [4]. Исходя из этого, одной из задач исследования является изучение процессов износа режущего инструмента. Контроль износа по задней поверхности проводится периодически при помощи отсчётного микроскопа МПБ-2, цена деления 0,05 мм.

При проведении экспериментов по обработке заготовок используется токарно-винторезный станок немецкой компании Optimum D460x1000 DPA, который относится к средним станкам, отличающимся повышенной плавностью хода и отсутствием вибраций. Измеренное радиальное биение шпинделя составляет 0,005 мм, что соответствует условиям «твёрдого точения». Диапазоны подач и частот вращения шпинделя станка удовлетворяют выбранным для экспериментирования диапазонам варьирования.



Рисунок 3 – Станок Optimum D460x1000 DPA

Проведённые исследования позволяют сделать вывод о возможности проведения ускоренных испытаний для составления модели, определения параметров модели и диапазона их варьирования. На основе разработанной методики планируется проведение дальнейших исследований:

– экспериментальное определение оптимальных соотношений подачи скорости резания для композитов, изготавливаемых в лаборатории наноструктурных и сверхтвердых материалов Объединенного института машиностроения НАН Беларуси;

– моделирование процесса изнашивания материалов $cBN-wBN-AlB_2/AlN$ и $cBN-Al$, используемых в качестве вставок лезвийных инструментов для «твёрдого точения»;

– определение эффективности замены шлифования длинных валов «твёрдым точением» инструментом, оснащённым вставками вышеуказанных материалов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. 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/KhPI-Press/20359/1/STvMS_2010_5_Zubar_Lezviynaya.pdf.

2. Инструменты из сверхтвердых материалов / Под ред. Н. В. Новикова. – М : Машиностроение, 2005. – 555 с.

3. 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.

4. 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.

5. Исследование режущих свойств резцов из нитрида бора / С. В. Грубый, В. В. Лапшин. – М. : Наука и образование, ФГБОУ ВПО МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. – С. 61–74.

УДК 681.5

РОБОТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА БЫСТРОСМЕННЫХ ЗАХВАТОВ И СБОРОЧНЫХ ИНСТРУМЕНТОВ ПРОМЫШЛЕННЫХ РОБОТОВ

Матрунчик Ю. Н.¹, Шлейко Т. А.²

*1) Белорусский национальный технический университет,
г. Минск Республика Беларусь*

*2) Учреждение образования «Национальный детский технопарк»,
г. Минск Республика Беларусь*

Исследовательский проект «Роботизированная система быстросменных захватов и сборочных инструментов промышленных роботов» является результатом реализации индивидуальной программы дополнительного образования одаренных детей и молодежи заочной (дистанционной) формы получения образования УО НДТП РБ.

Основные цели проекта – автоматизация производственных процессов и освобождение человека от механических рутинных действий по смене инструмента и выполнению простых технических манипуляций, снижение стоимости оснастки промышленных роботов и создание энергоэффективных аналогов уже существующих видов быстросменных приспособлений для установки инструмента и захватов промышленных роботов, расширение номенклатуры быстросменного инструментария в робототехнических производственных системах.

Задача проекта – разработка роботизированной системы быстросменных захватов и сборочных инструментов промышленных роботов. А именно:

- Разработка механической части робота, которая включает в себя: манипулятор, механизм транспортирования инструмента, а также магазины быстросменных инструментов.

- Создание электрической принципиальной схемы робота, включающую в себя систему питания, набор датчиков для ориентирования робота в рабочем пространстве и для точной работы с заготовкой (позиционирования деталей и подборок), микроконтроллер для управления всеми узлами робота, электродвигатели для работы механизма перемещения инструмента и проводную часть.

- Разработка алгоритма работы робота и его вспомогательного оборудования, программного обеспечения для микроконтроллера, обрабатывающего показания датчиков и управляющего роботизированной оснасткой, а также траекторией движения и положением манипулятора.

Актуальность разработки роботизированной системы быстросменных захватов и сборочных инструментов промышленных роботов не вызывает сомнений, поскольку в наше высокотехнологичное время все ещё существуют предприятия, которые имеют низкий уровень роботизации и вследствие этого спрос на варианты оснастки роботов сменным инструментом, не требующим участия человека в рабочем процессе, а только в процессе управления РТС в целом. И особенно на те, которые могут выполнять несколько технологических задач на одном рабочем месте.

Обзор существующих аналогов показал наличие необходимости создания системы, в которой должно быть предусмотрено использование большего числа различного инструмента, с одинаковым типоразмером посадочных отверстий и специального механизма крепления с возможностью автоматизации (роботизации) процесса смены инструмента.

Кроме того, разработанная роботизированная система дополнена магазинами сменных инструментов, с возможностью транспортирования дополнительного инструмента в зону обслуживания промышленного робота.

На обучение управлением данной системой пользователям не нужно тратить много времени, ведь управление включает в себя минимальный набор действий, необходимых от человека. Робот может автономно выполнять поставленные задачи в любое время и в любом количестве по заранее записанной в памяти микроконтроллера управляющей программе

Роботизированная система быстросменных захватов и сборочных инструментов промышленных роботов включает в себя манипуляционного промышленного робота, оснащенного дополнительными вспомогательными устрой-

ствами и набором датчиков параметров внешней среды и непосредственно самого робота.

На стадии проектирования для отладки и проверки работоспособности устройства быстросменного инструмента был выбран коллаборативный промышленный робот компании Universal robots (Дания) UR3, в дальнейшем был сконструирован прототип промышленного антропоморфного манипулятора на шаговых двигателях, управляемого микроконтроллером семейства AVR ATmega328P. В свою очередь, система управления устройств автоматической смены инструмента, построена также на базе микроконтроллера ATmega328P, с использованием управляющей платы типа Arduino UNO, кроме того, могут быть использованы дополнительные платы управления отдельными устройствами быстросменных магазинов инструмента, на базе того же микроконтроллера, установленного на плате Arduino Uno R3 или Nano.

Система не автоматическая, а автоматизированная – управленческая функция возложена на пользователя, поскольку чаще всего недостаточно только информации с датчиков для принятия решения.

Траектория движения робота зависит от выбранной технологической операции, согласно тех. заданию по обработке соответствующей детали или сборки.

Робот-манипулятор оснащен механизмом смены инструмента, управляемый от собственного микроконтроллера. Дополнительно могут быть установлены датчики положения, параметры которых передаются пользователю на ПК для контроля и принятия решения по их изменению для правильного позиционирования робота и обрабатываемых деталей в рабочем пространстве манипулятора.

Роботизированный магазин сменных инструментов оснащен механизмом ориентирования быстросменного инструмента в номенклатуре заданного типоразмера.

На всех устройствах роботизированной системы установлены светодиодные индикаторы, сигнализирующие о процессе рабочего движения, кроме того, на одном из устройств можно установить динамик для звуковой сигнализации, чтобы пользователь мог знать, где сейчас находится манипулятор в случае, когда оператор не может визуально контролировать рабочую зону.

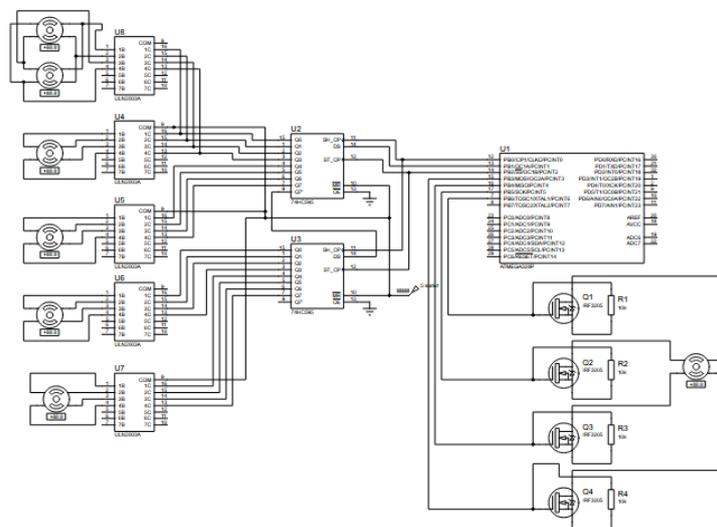


Рисунок 1 – Схема управления

Электрическая принципиальная схема роботизированной системы быстросменных захватов и сборочных инструментов промышленных роботов представлена на рисунке 1.

Алгоритм работы предусматривает последовательное включение ЩД для проворота механизмов зажимного приспособления. Позиционирование частей механизма происходит по сигналу обратной связи датчиков положения.

Для расширения возможностей системы предусмотрено несколько вариантов работы, выбор которых осуществляется по нажатию кнопок.

Индикация выбранных режимов осуществляется с помощью светодиодов.

Аварийная сигнализация (красный светодиод и пьезодинамик) включается в случае неправильной работы или когда операция манипулирования осуществляется в непосредственной близости от человека и может нанести ему вред.

Для создания элементов механизма зажимных приспособлений и манипулятора использовалась система автоматизированного проектирования (САПР) SolidWorks и Blender – свободно распространяемый 3D-редактор с открытым исходным кодом.

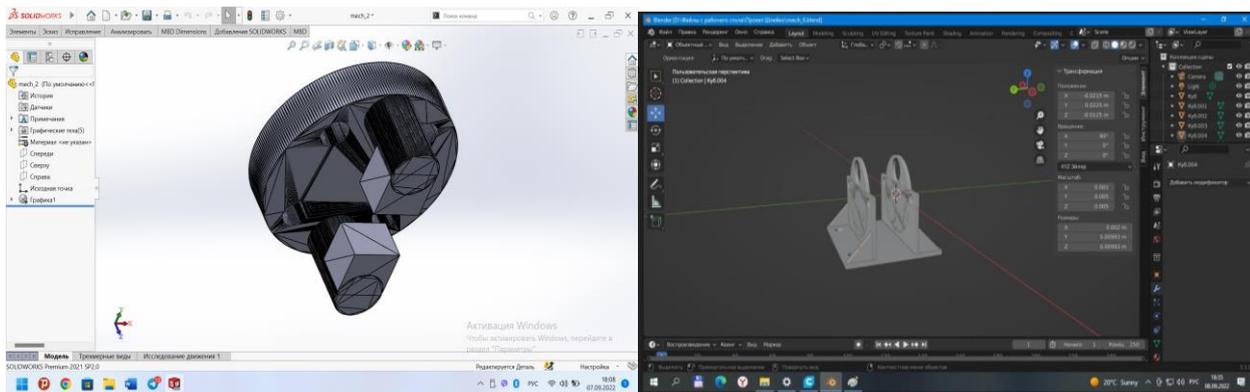


Рисунок 2 – Примеры 3D-моделей деталей разрабатываемых элементов конструкции

Функционал разработанной роботизированной системы быстросменных захватов и сборочных инструментов промышленных роботов полностью соответствует заданию и реализует весь алгоритм с помощью выполнения программ, записанных в микроконтроллеры.

Система датчиков позволяет пользователю наблюдать за изменениями параметров рабочего пространства, непосредственно самого манипулятора и автоматизированного быстросменного захватного устройства и своевременно настраивать их.

Роботизированная система быстросменных захватов и сборочных инструментов промышленных роботов работает в программно заданном режиме с возможностью реализации различных заданий.

Таким образом, можно сделать вывод, что разработанный прототип роботизированной системы быстросменных захватов и сборочных инструментов промышленных роботов полностью обеспечивает весь спектр заявленных заданий и может быть взят за перспективную модель для последующей производственной реализации.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Тягунов, О. А. Математические модели и алгоритмы управления промышленных транспортных роботов / О. А. Тягунов// Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2013. – Т. 5, № 5. – С. 69.
2. Околов, А. Р. Программное обеспечение промышленных роботов: учебно-методическое пособие для студентов учреждений высшего образования по специальностям 1-53 01 01 "Автоматизация технологических процессов и производств", 1-54 01 06 "Промышленные роботы и робототехнические комплексы" / А. Р. Околов, Ю. Н. Матрунчик; Министерство образования Республики Беларусь, Белорусский национальный технический университет, Кафедра "Робототехнические системы". – Минск: БНТУ, 2021. – 65, [1] с.: ил., табл. – Режим доступа : <https://rep.bntu.by/handle/data/91428>.

УДК 621.7

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ ЛАЗЕРНОЙ ЗАКАЛКИ НА ВРЕМЕННОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ СТАЛИ 40X13

*Мищирук О. М., Нерода М. В., Веремейчик А. И., Холодарь Б. Г.
Брестский государственный технический университет,
г. Брест, Республика Беларусь*

В настоящее время сталь является основным конструкционным материалом, т. к. обладает высокими эксплуатационными характеристиками и соответствует многим экономическим требованиям. Возможность улучшения эксплуатационно-технических свойств стали за счет применения современных упрочняющих технологий является важным ее достоинством, как конструкционного материала [1]. Современные методы поверхностной обработки (плазма, ионные пучки, электронные и лазерные лучи) ориентированы на придание повышенных физико-механических характеристик поверхностному слою при сохранении неизменными свойств основного металла детали [2, 3]. Такие преимущества сфокусированного лазерного излучения, как бесконтактность и локальность теплового воздействия, минимальная зона термического влияния, высокие скорости нагрева и охлаждения, снижение уровня остаточных напряжений, сведение к минимуму коробления, повышение дисперсности структуры и т. д., обуславливают частое применение лазерных технологий поверхностной обработки в качестве замены традиционных методов термической обработки [4].

С целью исследований влияния режимов лазерной поверхностной обработки на прочностные характеристики стали 40X13 были испытаны 18 образцов на статическое растяжение. Образцы были изготовлены при помощи водной резки и имеют размеры 7x20x200 мм (рисунок 1) [5]. Перед испытаниями образцы подвергались лазерной поверхностной обработке волоконным иттербиевым лазером мощностью 1 кВт при пяти различных режимах обработки (таблица 1). Данный вид лазера был выбран в связи с тем, что излучение с длиной волны порядка 1 мкм лучше взаимодействует с поверхностью металла по сравнению с излучени-

ем CO₂-лазеров, что в свою очередь повышает эффективность заковки [6]. Обработка при одном и том же режиме применялась к трем образцам одной партии, а также три образца не подвергались термической обработке. На поверхность наносились лазерные дорожки в продольном направлении образцов с двух сторон, количество которых зависело от размеров лазерного пятна.

В процессе изготовления и термообработки образцы были деформированы в продольном направлении, в результате чего незначительно изменилась форма поперечного сечения, в связи с чем их размеры получили отклонения от исходных размеров. Но так как объем материала образцов не изменился, то для последующих расчетов временного сопротивления площадь поперечного сечения обработанных образцов принималась такой же, как и у необработанных и равной 141,4 мм².

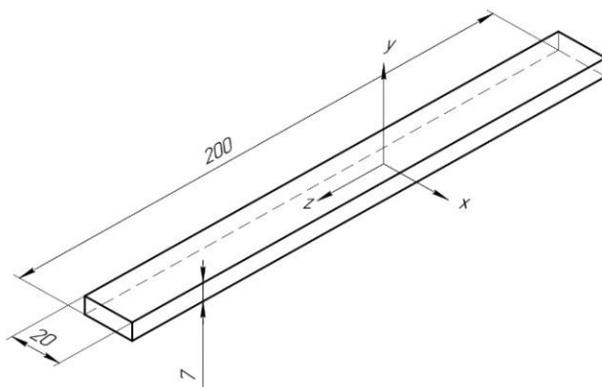


Рисунок 1 – Габаритные размеры образцов

Таблица 1 – Режимы лазерной обработки

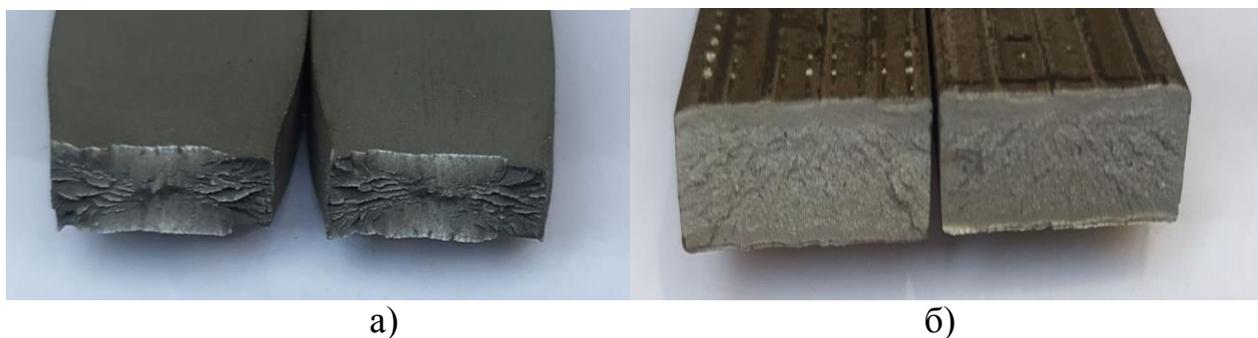
Пятно сканирования, мм	Скорость сканирования, мм/мин	Номер образца	Мощность лазера, кВт
400x225 (4x2,25) 7 дорожек	500	1а, 1б, 1в	1
	700	2а, 2б, 2в	
	1000	3а, 3б, 3в	
300x300 (3x3) 10 дорожек	700	4а, 4б, 4в	
400x225 (4x2,25) 7 дорожек		5а, 5б, 5в	

Для деталей, работающих на растяжение (сжатие), заковка должна обеспечивать полную прокаливаемость по сечению, но так как глубина зоны лазерной обработки невелика (доли миллиметра) и мала по сравнению с толщиной детали, то по глубине зоны обработки напряжение в нагруженной детали изменяется мало, его градиентом можно пренебречь, и поэтому допускаем, что оценку работоспособности детали можно проводить на примере однородного растяжения по всему ее объему. Для определения прочностных характеристик образцы испытывались на статическое растяжение согласно ГОСТ 1497-84 «Металлы. Методы испытаний на растяжение» и проводились на разрывной машине ИР 5145-500-11 при нагружении со скоростью 5 мм/мин (рисунок 2).



Рисунок 2 – Испытания образцов материала на растяжение

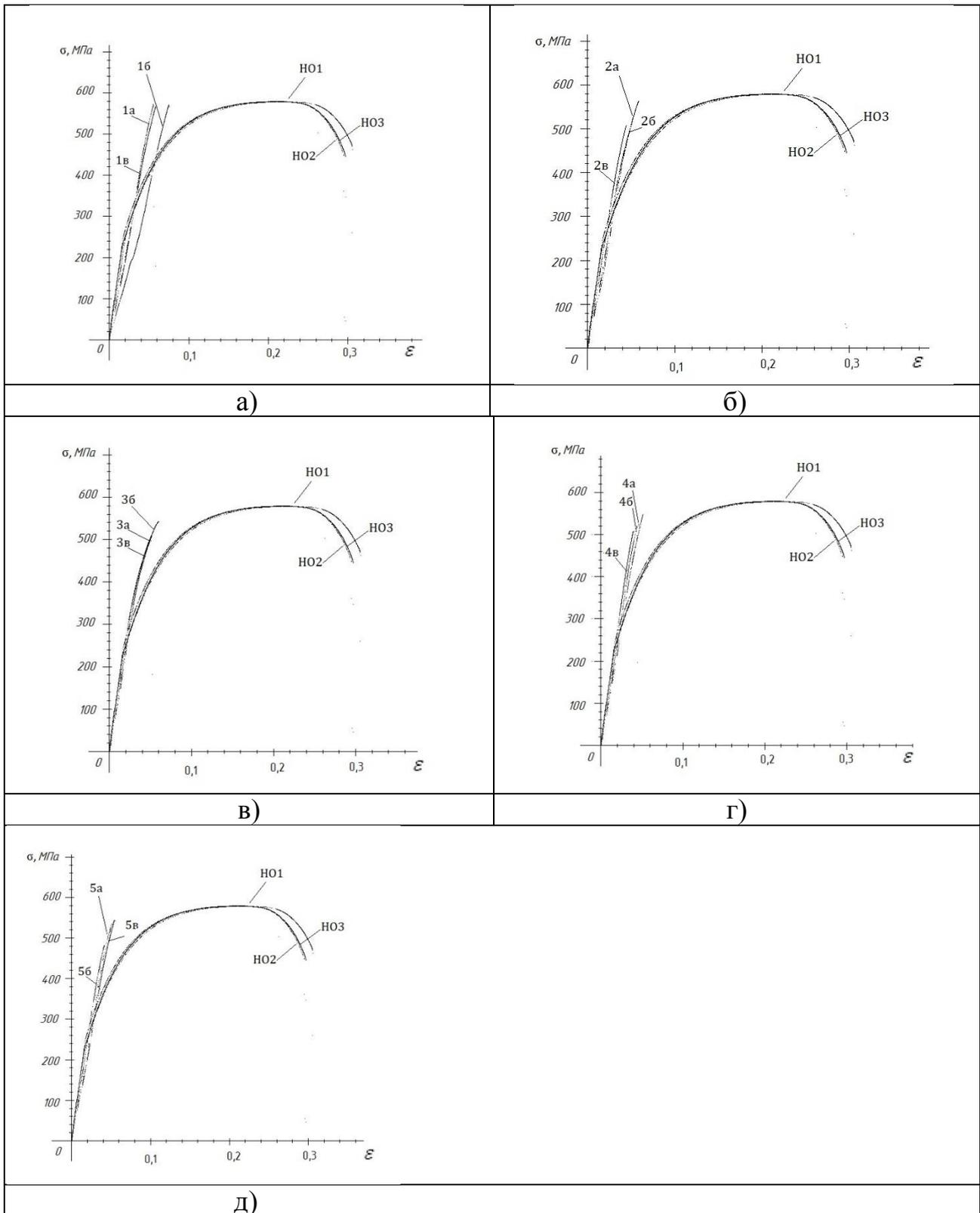
Испытания на статическое растяжение необработанных образцов (НО) происходили как для вязких металлов с образованием «шейки», уменьшением площади поперечного сечения и увеличением длины. Их разрушение произошло в пределах расчетной длины. Испытания термообработанных образцов носили хрупкий характер. Имели место небольшие деформации без образования «шейки». Все испытанные образцы разрушились по сечениям, перпендикулярным направлению растягивающей нагрузки. Плоскость разрушения всех нетермообработанных образцов перпендикулярна к поверхности образца и по толщине в ее структуре выражены три участка – средний и два поверхностных (рисунок 3), что свидетельствует о значительном наклепе поверхностных слоев.



а) – НО2; б) – 1в
Рисунок 3 – Сечения разрушенных образцов

Хрупкое разрушение закаленных образцов произошло по границам зерен или плоскостям легкого скольжения внутри зерен. Хрупкий излом имеет зернистый рельеф, состоит из множества блестящих граней. Такой характер разрушения можно объяснить возникновением в образце зон измененной структуры исходного материала, которые оказывают влияние на локальное напряженно-деформированное состояние материала в своей окрестности. Их разрушение произошло как в пределах расчетной длины, так и за ее пределами, и у зажимов.

По результатам проведенных испытаний были построены зависимости напряжений, возникающих в образцах (σ), от деформации (ε) (рисунок 4). Для сравнения графиков выполнено их наложение на графики образцов, не подвергаемых лазерной обработке.



а) – партия № 1; б) – партия № 2; в) – партия № 3;
 г) – партия № 4; д) – партия № 5

Рисунок 4 – Зависимость σ от ϵ образцов

Анализ диаграмм растяжения показал незначительное влияние лазерной обработки на величину модуля упругости материала. Следует отметить значительное повышение предела текучести термообработанного материала по срав-

нению с необработанным. В ходе испытаний было определено временное сопротивление (таблица 2) для каждого образца, т. к. конструктору данный параметр необходим для определения размеров детали, а технологу – для назначения режимов обработки.

Результаты проведенных экспериментов указывают на хрупкое разрушение термообработанных образцов вследствие наличия горячих трещин от дорожек, возникших из-за больших скоростей нагрева и охлаждения. Временное сопротивление закаленных образцов из партий № 2–5 уменьшилось на 5...20 % с заметным снижением характеристик пластичности, но для образцов из партии № 1 оно незначительно увеличилось. Данный эффект предположительно связан с большей прокаливаемостью вследствие меньшей скорости термической обработки. Диаграммы растяжения показали незначительное изменение модуля упругости образцов после лазерной обработки по сравнению с необработанными.

Таблица 2 – Некоторые характеристики при испытании плоских образцов

Марка	Номер плавки	Маркировка	Временное сопротивление, σ_b , МПа	Относительное удлинение, δ , %	Марка	Номер плавки	Маркировка	Временное сопротивление, σ_b , МПа	Относительное удлинение, δ , %
1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
необработанные	НО	1	578,99	21,27	4x2,25 (7 дорожек) 700 мм/мин	2	а	569,94	1,29
		2	579,28	21,52			б	525,25	0,71
		3	579,07	21,52			в	522,98	1,71
4x2,25 (7 дорожек) 1000 мм/мин	3	а	524,26	1,57	4x2,25 (7 дорожек) 700 мм/мин	5	а	540,95	–
		б	556,65	2,57			б	487,34	0,86
		в	523,48	2,57			в	547,45	1,14
4x2,25 (7 дорожек) 500 мм/мин	1	а	594,70	1,29	3x3 (10 дорожек) 700 мм/мин	4	а	562,09	0,57
		б	577,30	1			б	536,99	–
		в	584,23	1			в	514,64	0,71

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Мищирук, О. М. Особенности лазерного упрочнения сталей / О. М. Мищирук, М. В. Нерода, А. И. Веремейчик // Новые технологии и материалы, автоматизация производства : сб. ст. Междунар. науч.-техн. конф., посвященной 55-летию Брест. гос. техн. ун-та, Брест, 29–30 сент. 2021 г. / Брест. гос. техн. ун-т – Брест : Изд-во БрГТУ, 2021. – С. 121–124.

2. Андрияхин, В. М. Расчет поверхностной закалки железоуглеродистых сплавов с помощью технологических CO₂-лазеров непрерывного действия / В. М. Андрияхин, В. С. Майоров, В. П. Якунин // Поверхность: Физика, химия, механика. – 1983. – № 6. – С. 140–147.

3. Веремейчик, А. И. Плазменные технологии как одни из основных технологий повышения эксплуатационных свойств металлоизделий / А. И. Веремей-

чик, М. И. Сазонов, В. М. Хвисевич // Механика. Научные исследования и учебно-методические разработки : междунар. сб. науч. тр. / Бел. гос. ун-т транспорта. – Гомель, 2008. – Вып. 2. – С. 6–12.

4. 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 "Физико-технич. ин-т НАН Беларуси" ; редколлегия: А. В. Белый (главный редактор) [и др.]. – Минск, 2018. – Кн. 2: Технологии и оборудование механической и физико-технической обработки. С. 58–65.

5. Металлы. Методы испытаний на растяжение: ГОСТ 1497 – 84. – Взамен ГОСТ 1497 – 73; введ. 1986 – 01 – 01. – М. : Стандартиформ, 2008. – 26 с.

6. Девойно, О. Г. Моделирование поверхностной закалки с использованием сконирующего оптоволоконного лазера / О. Г. Девойно, В. В. Жврский, А. П. Пилипчук // Известия НАН Беларуси. Серия физико-технических наук. – Минск, 2018. – Т. 63, №4 – С. 435–443.

УДК 678.01

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МЕХАНОАКТИВИРОВАННЫХ ТЕРМОПЛАСТИЧНЫХ КОМПОЗИТОВ

***Овчинников Е. В.¹, Хвисевич В. М.², Жуков Ю. А.¹, Веремейчик А. И.²,
Онысько С. Р.², Григорьева Т. Ф.³, Кочнева А. Ю.¹***

*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*

Проведенный анализ литературных источников посвященный различным аспектам создания механоактивированных низкоразмерных частиц и композитов на их основе, свидетельствует о существовании значительных пробелов в области теоретического описания особенностей строения, структуры и свойств наноразмерных механоактивированных систем. Это обусловлено в большей степени тем, что в материаловедении, физике твердого тела существуют подходы, заключающиеся в применении классических представлений, принятых в физике твердого тела для анализа объектов, находящихся на границе раздела между молекулярными агрегатами и микрочастицами с характерными свойствами макроструктур. Показательными в этом отношении являются общепринятый в механохимическом материаловедении подход, согласно которому ультрамалые частицы по эффективности модифицирующего действия на окружающую среду делят на инертные и активные. Однако экспериментально установлено, что возможно изменение как состава, так и структуры данных низкоразмерных объектов, что может приводить к инверсии активности частиц,

находящихся в конденсированных средах различного агрегатного состояния. В ряде случаев наблюдается изменение активности частиц при воздействии внешних факторов на модифицированную матрицу. Кроме того, из экспериментальных и теоретических представлений механохимии известно, что при определенных видах энергетического воздействия, например, диспергирования так называемых «инертных» веществ, например, силикатных минералов, существует вполне определенный размерный порог, после которого дисперсная инертная частица приобретает активность в процессах адсорбционного и химического взаимодействия с матрицей и окружающей средой. Применение механохимического подхода для формирования композиционных материалов из термодинамически несовместимых полимеров с точки зрения эффективности практического применения является наиболее перспективным направлением функционального полимерного материаловедения [1–4].

Представляет интерес изучить теплофизические характеристики полиамида, механоактивированного при различных режимах. Наличие в его структуре ненасыщенных связей, несимметричность строения, что обуславливает его полярность и должно позволить активно вступать в механохимические реакции, представляет интерес при формировании композиционных материалов на основе полиамидов с повышенными эксплуатационными свойствами.

В качестве объектов исследований использовали порошки полимеров и силикатов. Порошок полиамида 6 получали методом криогенным измельчением гранулированного ПА6-210/310 (ОАО «Химволокно»), охлажденного до температуры жидкого азота. Дисперсность порошков, применяемых для нанесения покрытий, находилась в пределах от 80 до 200 мкм.

Механоактивацию проводили в шаровой мельнице планетарного типа марки АГО-2. Время механоактивации составляло от 6 до 60 с при ускорении 60 g. Полимерные частицы подвергались механоактивированию совместно с ультрадисперсным SiO₂ и каолинитом. Дисперсность силикатных частиц составляла от 5 до 60 мкм, в зависимости от вида модификатора. Определение теплофизических характеристик, а также фазовых переходов исследуемых веществ проводили на дериватографе Termoscan-2, скорость нагрева образца составляла 5° С/мин.

Согласно имеющихся в литературе данным [5], термограммы полиамидов характеризуются четко выраженными максимумами. Температуры плавления, определенные исходя из положения пиков, хорошо согласуются с данными, имеющимися в литературе. Термограмма порошкообразного поли-ε-капроамида, полученного из капролактама, содержит изгиб области 50 °С и соответствует температуре стеклования.

В случае, если в процессе криогенного измельчения происходят структурные изменения, сопровождающиеся ориентацией кристаллитов в определенном направлении, то перед плавлением образца должна наблюдаться их дезориентация и на термограмме полиамида в области плавления материала возникает дублет. Первый экзотермический пик соответствует процессу дезориентации, за которым следует плавление полимера. Если образец, имеющий внутреннюю текстуру, нагреть до температуры дезориентации и затем медленно охладить до комнатной температуры, то термограмма, полученная от этого образца, будет

характеризоваться наличием одного пика, соответствующего температуре плавления образца полиамида 6 до его нагревания.

Согласно данным ДТА-анализа, в термограмме дисперсных частиц полиамида 6 в области температур 128 °С – 205 °С наблюдается наличие экзотермического пика, соответствующего интенсивному окислению полиамида 6 в твердом состоянии. Эндотермический пик, находящийся в области 205 °С – 232 °С, соответствует плавлению кристаллической составляющей полиамида 6. Эндотермические пики, находящиеся в области 299 °С – 390 °С и 391 °С – 407 °С, соответствуют дальнейшему окислению полимера и его деструкции, сопровождающейся пиролизом полимера с увеличением температуры нагрева.

Исходя из типа термограммы, возможно предположить, что в исследуемых криогенно измельченных порошкообразных образцах полиамидов для кристаллической составляющей соответствует α -форма моноклинной и триклинной модификации [5]. Для блочных образцов ПА 6 началу первого пика экзотермической реакции, отвечающего за окисление образца на воздухе, соответствует температура 180 °С, тогда как у порошкообразного криогенно измельченного образца окислительный процесс начинается при 128 °С. Возможно предположить, что в процессе криогенного измельчения происходят деструкционные процессы с образованием ненасыщенных связей, которые при нагревании вступают во взаимодействие с кислородом воздуха и смещают начало окислительных реакций в полиамиде в низкотемпературную область.

Проведение механоактивации полиамида 6 в течение 30 с приводит к изменению начала протекания окислительных процессов в полиамиде 6. В области температур 151–212 °С наблюдается наличие экзотермического пика, соответствующего интенсивному окислению полиамида 6 в твердом состоянии.

Эндотермический пик, находящийся в области 212–223 °С, соответствует плавлению кристаллической составляющей полиамида 6. Эндотермические пики, находящиеся в области 270–319 °С, 339–355 °С, 376–388 °С, соответствуют дальнейшему окислению полимера на воздухе и его деструкции, сопровождающейся пиролизом полимера с увеличением температуры нагрева. Возможно предположить, что для механоактивированного полиамида 6 кристаллической части данного полимера соответствует метастабильная псевдогексагональная γ' -форма. Считается, что γ' -форма полиамида 6 является более стойкой к термическому окислению, чем α -форма. При более упорядоченной структуре, какой является α -форма, количество мономера в межсферолитных областях должно быть больше, чем при наличии γ' -формы. Поэтому при термическом воздействии на α -форму выделяется большее количество мономера, который активно окисляется на воздухе при повышенных температурах.

Необходимо отметить, что метастабильность γ' -формы ПА 6 не исключает возможности перехода их α -форму в процессе термического анализа. Методом рентгеноструктурного анализа показано, что при нагревании до определенных температур образцов полиамидов с исходной γ' -формой со скоростью 5 °С/мин происходит частичная рекристаллизация γ' -формы в α -форму. Однако полного превращения $\gamma' \rightarrow \alpha$ -форму не происходит [5].

Наразличное поведение γ' - и α -форм полиамида при термоокислении оказывают влияние два основных фактора, возможно различающихся в начале экспе-

римента или неидентично изменяющихся в ходе окисления: степень кристалличности в рамках одной кристаллической модификации и полиморфные превращения полимерной микроструктуры в другую кристаллическую форму, являющуюся или менее доступной кислороду (диффузионные аспекты), или менее реакционно способной ввиду изменения других физико-механических факторов (изменения количества Н-связей, их расположение, экранирование функциональных групп, эффекты поля и др.). При полиморфном переходе из одной термодинамически неравновесной модификации в другую, более совершенную, совокупность указанных факторов накладывается, и определить это влияние в чистом виде не всегда представляется возможным [5].

Проведение совместной механоактивации криогенно измельченного порошкообразного полиамида 6 с каолинитом приводит к увеличению температуры плавления исследуемого образца, что может свидетельствовать о возрастании степени кристалличности или молекулярной массы. В области температур 193 °С – 214 °С наблюдается наличие экзотермического пика, соответствующего интенсивному окислению механоактивированной смеси полимера и алюмосиликата. Эндотермический пик, находящийся в области 214 °С – 231 °С соответствует плавлению кристаллической составляющей полиамида 6. Эндотермические пики, находящиеся в области 280 °С – 337 °С, 359 °С – 369 °С, 369 °С – 389 °С, соответствуют дальнейшему окислению полимера на воздухе и его деструкции, сопровождающейся пиролизом полимера с увеличением температуры нагрева.

Как и в случае механоактивации полиамида 6, основой кристаллической части полимера является γ' -форма. Совместная механоактивация полиамида 6 и каолинита уменьшает интенсивность протекания термоокислительных процессов в композиции и смещает их начало в высокотемпературную область. Каолинит относится к глинистым минералам из группы водных силикатов алюминия следующего химического состава: $Al_4[Si_4O_{10}](OH)_8$ и содержит 39,5 % Al_2O_3 , 46,5 % SiO_2 , 14 % H_2O . Данная структура позволяет предположить высокую активность при реакциях с полимерами, протекающих при внешних воздействиях. Установлено, что в структуре каолинита содержатся ультрамелкие шестигранные кристаллы, размер которых близок к нанодиапазону. В основе кристаллической структуры каолинита лежат слои из тетраэдров Si-O₄, имеющих три общих кислорода и связанных попарно через свободные вершины алюминием и гидроксидом. Эти слои соединены между собой слабыми связями, что обуславливает весьма совершенную спайность каолинита и возможность различного наложения одного слоя на другой, что также сказывается на активности данного минерала.

Таким образом, при совместной механоактивации каолинита и полиамида 6 происходит взаимодействие радикальных групп и ненасыщенных связей полиамида с активными центрами на поверхности кристаллов каолинита, что в свою очередь повышает термоокислительную стабильность данной композиции. Замена каолинита ультрадисперсным силикатом (аэросилом) в композиции с полиамидом 6 приводит к незначительному изменению теплофизических характеристик композиционного материала. Начало окислительных процессов в композиции наблюдается при 165 °С, однако увеличивается интенсивность данного процесса, температура плавления соответствует значениям, как и для

порошкообразного полиамида 6. Окислительные процессы в расплаве полимера начинаются с 240 °С, что свидетельствует о низкой термоокислительной стабильности данной композиции.

Таким образом, установлено, что основной структурной составляющей кристаллической части криогенноизмельченного полиамида 6 является γ' -форма. Проведение механоактивации дисперсных частиц криогенноизмельченного полиамида 6 приводит к увеличению стойкости полимеров к термоокислению. Совместное механоактивирование дисперсных частиц полиамида 6 с силикатными частицами различной природы приводит к неоднозначным результатам по изменению теплофизических характеристик полиамида. Введение в композицию каолинита улучшает стойкость к термоокислительной деструкции, в то время как применение аэросила ухудшает стойкость исходного полимера к воздействию окислительной среды.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Механохимический синтез дисперсных слоистых композитов на основе каолинита и высших карбоновых кислот / Т. Ф. Григорьева [и др.] // Доклады Российской академии наук. – 1995. – Т. 341, № 1. – С. 66–68.
2. Механоактивированные наполнители для полимерных нанокомпозитов на основе регенерированных термопластов / Т. Ф. Григорьева [и др.] // Веснік ГрДУ, сер. 6. – 2011. – № 1 (116). – С. 25–28.
3. Прогрессивные технологии нанесения покрытий / С. В. Авдейчик [и др.]; под ред. А. В. Киричека. – М. : Изд. дом «Спектр», 2012. – 272 с.
4. Технологическое обеспечение качества и ресурса при изготовлении, сборке, ремонте и восстановлении. / С. М. Белобородов [и др.]; под ред. А. В. Киричека. – М. : Издательский дом «Спектр», 2012. – 284 с.
5. Прогрессивные машиностроительные технологии / С. В. Авдейчик [и др.]; под ред. А. В. Киричека. – М. : Издательский дом «Спектр», 2012. – Том II. – 336 с.

УДК 681.32

ПЕРЕРАБОТКА БЫВШИХ В УПОТРЕБЛЕНИИ ТРУБ ХОЛОДНОЙ ПИЛЬГЕРНОЙ ВАЛКОВОЙ ПРОКАТКОЙ

Пилипенко С. В., Фруцкий В. А.

*Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой,
Новополоцк, Республика Беларусь*

В гидравлических системах машин и механизмов используется большое количество трубопроводов различного назначения. Кроме того, трубные изделия различной формы поперечного сечения используются в рамах, корпусах и других частях машин. Прежде чем получить окончательную форму и необходимые механические характеристики, материал труб проходит значительные по стоимости и экологическому воздействию стадии передела [1–2]. С другой стороны, большое количество труб, не имеющих значительной степени износа, поступа-

ют на переплавку [3]. Разработка технологии переработки такого типа вторсырья является актуальной научно-технической проблемой.

Целью работы является разработка технологии переработки бывших в употреблении труб с восстановлением их эксплуатационных характеристик.

Прежде чем поступить на машиностроительное предприятие труба проходит множество стадий передела (от добычи ископаемых до готовой трубной продукции (рисунок 1).

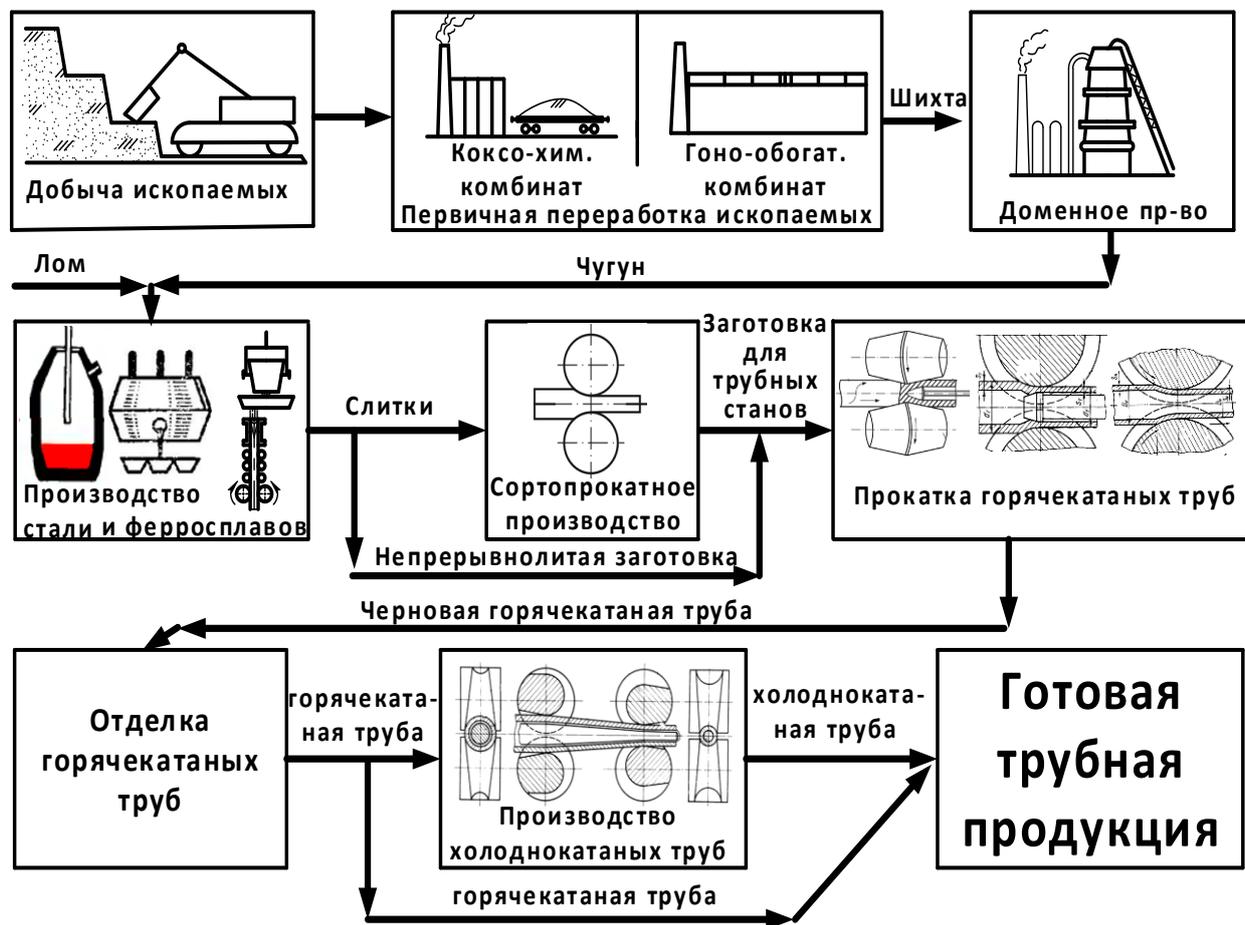


Рисунок 1 – Основные этапы переработки исходного сырья в трубный прокат

Как видно из рисунка 1, прежде чем поступить на стан горячей прокатки труб, исходное сырье проходит первичную переработку на коксо-химическом комбинате (коксуемые угли), горно-обогащительном (руда), далее, кокс и агломерат с другими шихтовыми материалами (в том числе ломом) поступает в доменный цех. Доменный цех передает передельный чугун в сталеплавильный цех, куда также поступают флюсы, ферросплавы и др. материалы шихты. Выплавленная сталь в виде слитков или непрерывнолитой заготовки является сырьем для сортопрокатного производства. Сама непрерывнолитая заготовка уже может быть основой для трубопрокатной продукции определенного сортамента. Но большинство горячекатаных труб производится из катанной, прессованной или кованной заготовки [4]. Само производство горячекатаных труб разделяется на непосредственно прокатное производство и отделку черновых

труб [4–5]. В отделку входит ряд операций (обрезка, разрезка, торцовка термообработка, химобработка и пр.), связанных с доведением труб до требований стандарта, по которому классифицируется данная трубная продукция. Большинство горячекатаных труб продается на рынке как готовая продукция, но часть произведенных труб (от 15 до 25 %) является заготовкой для цехов холодной прокатки [3, 5]. Холоднокатаная труба обладает повышенными показателями качества. Она имеет повышенную точность, особые показатели механических характеристик и пр. Кроме этого, холодной прокаткой можно получать тонкостенные трубы и трубы малого диаметра [1–6].

Большинство вышедших из эксплуатации труб поступает в качестве лома либо в сталепрокатный, либо в доменный цех. Очень часто такие трубы даже не имеют значительно износа [3] (особенно это касается нержавеющей труб и труб из цветных металлов). Для холодной прокатки достаточно иметь исходную заготовку в 1,5 метра (с незначительной реконструкцией загрузочной решетки стана). При разборе изготовленных из труб конструкций, отрезков такой и большей длины вполне достаточно, чтобы быть заготовкой для небольших партий труб. Учитывая цену такой заготовки, технология их переработки в готовые трубы с применением холодной прокатки экономически целесообразна.

Так, при наблюдаемой одним из авторов разборке павильона, основанием которой являлась сварная конструкция из труб 89x12 мм (Сталь 20), было отобрано и сдано на металлолом более тонны труб длиной отрезков более 2 метров. Случайно отобранных 4 отрезка показали, что коррозия не вывела данные трубы за требования стандарта ГОСТ 87-32, «Трубы стальные бесшовные горячекатаные», как по толщине стенки (от 11,3 до 13,74 мм), так и по диаметру (12,16–12,4 мм). Данная труба может классифицироваться как труба диаметром 89 мм с толщиной стенки 12,28 мм указанного стандарта. Такая труба вполне могла бы быть заготовкой, например, для прокатки холоднокатаной трубы ГОСТ Р 54159-2010 «Трубы стальные бесшовные и сварные холоднодеформированные общего назначения» диаметром 40 мм и толщиной 4 мм. В ходе холодной прокатки такая заготовка будет иметь механические характеристики, достаточные для получения удовлетворительных эксплуатационных качеств. Учитывая, что в ходе подобной операции количество серы и фосфора в металле уменьшается, то холодная прокатка таких труб позволит получить качественные с точки зрения химического состава трубы [3].

Основные операции технологии прокатки трубы по маршруту 89x12,28→40x4 мм (сталь 20) указаны на схеме (рисунок 2). Предложенная технология отличается от стандартной рядом операций, связанных с обработкой исходной заготовки. Следует более тщательно провести контроль качества (с применением ультразвуковой диагностики). Также возможно включение операции очистки наружной поверхности от краски и других загрязнений (опескоструивание, химобработка). Далее следует стандартная схема холодной прокатки труб.



Рисунок 2 – Предлагаемая схема основных операций холодной прокатки труб

В таблице 1 показаны характеристики холодной деформации трубы с использованием, например, станов ХПТ-90 и ХПТ-80.

Как видно из таблицы, имея заготовку в 1,5 метра, возможно получить готовую трубу длиной 9 метров (длина указана с учетом обрезки, химобработки и др. расходов металла в ходе техпроцесса). При длине заготовки в 2,5 метра получаем готовую трубу в 16,63 метра.

Таблица 1 – Технологические характеристики прокатки трубы из стали 20 по маршруту 89x12,28→40x4 мм

Диаметр трубы	Толщина стенки	Обжатие по диаметру	Обжатие по стенке	Обжатие по площади поперечного сечения	Длина трубы при загот. в 1,5 м	Длина трубы при заготовке в 2,5 м	Стан ХПТ
мм	мм	%	%	%	мм	мм	
89	12,28						
63	7,5	29,2	38,9	55,8	3,2	5,8	90
40	4	36,5	46,7	65,4	9,01	16,63	80

Выводы

До 70–80 % стоимости готовой холоднокатаной трубы составляет стоимость заготовки. Использование бывших в употреблении труб позволяет не только

экономить значительную часть металла, но и повысить коммерческую эффективность производства холоднокатаных труб и уменьшить антропогенную нагрузку на окружающую среду. Разработанная технология переработки бывших в употреблении труб холодной прокаткой не требует значительных капиталовложений и позволяет получать трубы с достаточными для их реализации характеристиками. Также не требуется значительных капиталовложений на переоборудования цеха холодной прокатки труб. При этом предложенная технология отличается от стандартной только на этапе подготовки заготовки к прокату, однако в стандартном цеху холодной прокатки имеется всё требующееся для этого оборудование. Изменения вводятся только в те операции технологического процесса, которые касаются подготовки исходной заготовки к первой прокатке на стане ХПТ. Как показала промышленная проверка подобной технологии: полученные подобным способом готовые трубы будут иметь достаточные для их безаварийной эксплуатации параметры качества.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Pilipenko, S. V. A deformation mode in a cold rolling condition to provide the necessary texture of the Ti-3Al-2.5V alloy / S. V. Pilipenko, V. U. Grigorenko, V. A. Kozechko, O. O. Bohdanov / *Naukovyi visnyk Natsionalnoho hirnychoho universytetu*. – 2021. – № 1. – p. 78–83.
2. Forney, C.E. Ti 3Al 2,5V seamless tubing engineering guide / C. E. Forney, H. S. Schemel. – Washington: Sandvik Special Metals Corp, 1987. – 115 p.
3. Томило, В. А. Утилизация бывших в употреблении труб холодной прокаткой / В. А. Томило, С. В. Пилипенко, А. В. Дудан // *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University Geo Assets Engineering*. 2022. – Т. – 333, № 8 – С. 118–125.
4. Машины и агрегаты для производства стальных труб. Учебник. / Шевакин Ю. Ф. [и др.]. – М. : Интермет Инжиниринг, 2007.
5. Друян, В. М. Теория и технология трубного производства./ В. М. Друян, Ю. Г. Гуляев, С. А. Чукмасов. – Днепропетровск : Днепр-ВАЛ, 2001. – 544 с.

УДК 621.785.545

ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ДИФФУЗИОННОГО НАСЫЩЕНИЯ ПРОВОЛОЧНОГО МАТЕРИАЛА

Семенченко М. В.

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

Формирование защитных покрытий предполагает использование широкой номенклатуры материалов. При выборе химического состава проволочного материала учитывают условия последующей эксплуатации упрочняемой или восстанавливаемой детали. Важное значение имеет перечень и процентное содержание легирующих элементов в формируемом слое, соблюдение технологии наплавки или напыления. При упрочнении или восстановлении дешевых мало-ресурсных деталей применение высоколегированного материала не всегда оправдано из-за его высокой стоимости. Покупка проволоки различных марок

в большинстве случаев воспринимается руководством предприятий как нерациональное расходование средств или представляется нецелесообразной в сложившейся экономической ситуации.

Диффузионное насыщение дешевой углеродистой проволоки представляется альтернативным вариантом для получения наплавочного материала с подходящим химическим составом, которым могут воспользоваться предприятия всех форм собственности [1]. Подобрав состав насыщающей смеси и режима термического воздействия, можно обеспечить поступление достаточного количества легирующих элементов в формируемое покрытие. В результате оптимизируются затраты на изготовление проволоки с нужным химическим составом. Становится доступным изготовление широкой номенклатуры проволоочного материала, которая может потребоваться при реализации восстановительных или упрочняющих технологий.

Печной нагрев для диффузионного насыщения проволоочного материала трудоемок и неэффективен. Требуется разработка специальных контейнеров [2], обеспечивающих равномерное распределение легирующих элементов в поверхностном слое, но при этом неизбежно уменьшается протяженность обработанного проволоочного материала. Кроме того, при последующем извлечении обработанной проволоки велика вероятность ухудшения качества сформированного диффузионного слоя с большим процентным содержанием легирующего элемента из-за откалывания отдельных фрагментов. Для предотвращения скалывания при нанесении и перераспределения легирующих элементов по объему выполняется термическая обработка, что неизбежно повышает стоимость обработки.

Способ диффузионного насыщения проволоки путем непосредственного пропускания электрического тока через проволоочный материал в режиме термоциклирования лишен подобных недостатков [3]. Позволяет выполнить обработку проволоки с различными линейными и поперечными размерами. Для его реализации была предложена специальная лабораторная установка [4], схема которой представлена на рисунке 1. Она состоит из трансформатора 1; контейнера с насыщающей смесью 2; токопроводящих роликов 3; блока управляющих импульсов 4; регулятора 5.

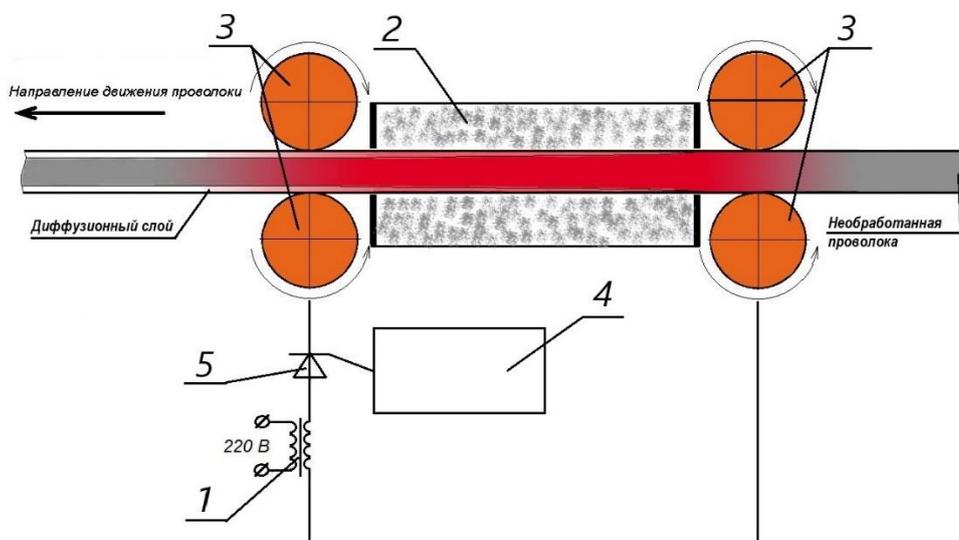


Рисунок 1 – Схема лабораторной установки для диффузионного насыщения проволоки

Работает установка следующим образом: необработанная проволока проходит контейнер 2 с насыщающей смесью со скоростью $V = 0 \dots 0.1$ м/мин. К токопроводящим роликам 3 подается электрический ток от трансформатора 1. Блок управляющих импульсов 4 через регулятор 5 обеспечивает реализацию режима термоциклирования. Электрический ток пропускают через проволоку циклически с длительностью импульса 1–10 секунд и длительностью паузы 1–3 секунд. Сила тока меняется от 15 до 30 А, напряжение составляет 16,8 В.

Сложность контроля текущих параметров процесса (силы тока, температуры), недостаточная производительность процесса из-за использования аналоговых элементов связи не позволяла получить проволоку с однородным химическим составом или структурой и ограничивала выбор режима обработки. Исключить перечисленные недостатки позволил переход на цифровое управление процессом диффузионного насыщения проволоочного материала.

Была предложена установка [5], состоящая из трансформатора 1, устройства контроля физических параметров 2, соединенного с блоком управления, выполненного в виде твердотельного реле 3, соединенного с контроллером 4, подключенным к источнику питания 5 на 12 В, контейнера с насыщающей смесью 6, на противоположных концах которого расположены токоподводящие попарно соприкасаемые ролики 7, катушки с обрабатываемой стальной проволокой 8, барабана для обработанной проволоки 9, схема которой представлена на рисунке 2.

Такое исполнение позволяет проконтролировать физические параметры процесса диффузионного насыщения проволоочного материала и существенно расширяет возможности оборудования. Становится возможной реализация диффузионного насыщения стальной проволоки в режиме термоциклирования со ступенчатым изменением режима термического воздействия.

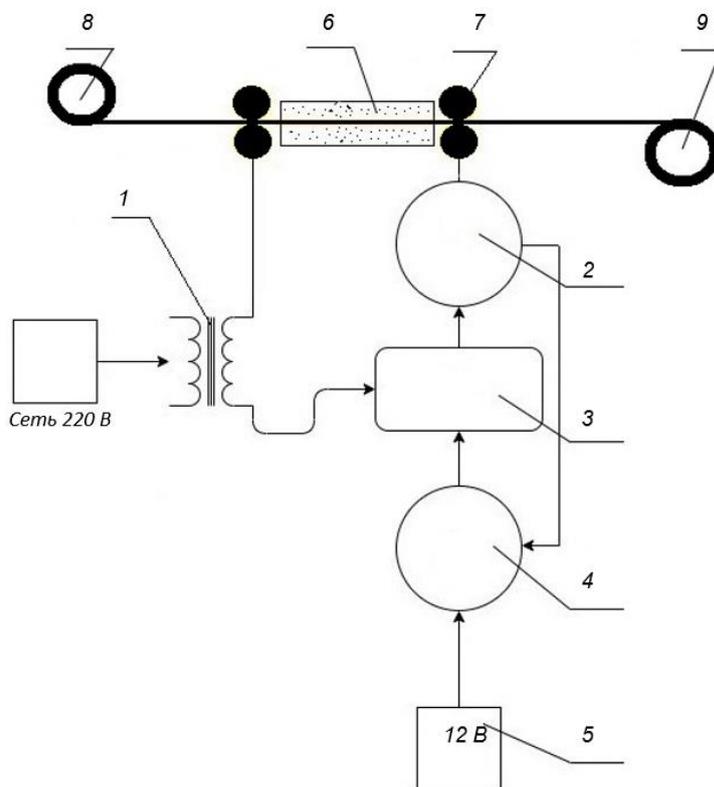


Рисунок 2 – Схема установки для диффузионного насыщения проволоки

Порядок работы установки следующий: от размоточного механизма (на схеме не показан), включающего катушку с обрабатываемой стальной проволокой 8 необработанная стальная проволока проходит контейнер 6 с насыщающей смесью с заданной постоянной скоростью или подается ступенчато с заданным шагом в зону обработки. Трансформатор 1, работающий от сети 220 В, обеспечивает подачу тока на токоподводящие ролики 7. Контроллер 4, соединенный с твердотельным реле 3, работает от источника питания 5. Сила электрического тока, проходящего через опытный образец, и температура стальной проволоки контролируются с помощью устройства контроля физических параметров 2.

Термоциклирование обеспечивается парой твердотельное реле 3 – контроллер 4. Контроллер 4, работающий от источника питания 5, позволяет задать время нагрева и охлаждения образца во время обработки. При поступлении управляющего сигнала от контроллера 4 твердотельное реле 3 разрывает цепь. Испытуемый образец охлаждается. После завершения заданного времени охлаждения контроллер 4 отправляет сигнал на твердотельное реле 3. Цепь замыкается. Испытуемый образец начинает нагреваться. Цикл обработки повторяется.

Ступенчатая обработка в режиме термоциклирования реализуется за счет наличия связи между устройством контроля физических параметров 2 и контроллером 4. При достижении заданных параметров устройство контроля физических параметров 2 отправляет управляющий сигнал на контроллер 4 для изменения режима обработки.

Опытный образец заявляемой установки изготовлен и опробован в научно-исследовательской лаборатории кафедры автомобильного транспорта Полоцкого государственного университета. Испытания подтвердили повышения качества диффузионного насыщения и термической обработки проволоки путем непосредственного пропускания тока через изделие за счет контроля физических параметров процесса и более точного энергетического воздействия на обрабатываемые объекты.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Boride hard-facing: United States Patent 4172162, C23F 7/00 – Ronald H. Smith; заявитель: Materials Development Corporation Заявл. Jun. 25, 1976, Опубл. Oct. 23, 1979.

2. Контейнер для химико-термической обработки проволоки: Патент на полезную модель РБ № 695В 21F 21/00 – В. М. Константинов, А. С. Губанов, Ф. И. Пантелеенко, М. В. Семенченко; заявитель УО «Полоц. гос. ун-т» № u20010301; заявл. 19.12.01; опубл. 30.12.02.

3. Способ диффузионного насыщения стальной проволоки: Патент на изобретения № 13370 МПК (2009) С 23С 8/00, С 23С 10/00, С 23D 1/34 – В. М. Константинов, М. В. Семенченко, В. Г. Дашкевич, А. С. Губанов; заявитель УО «Полоц. гос. ун-т» № а 20080742; заявл. 05.06.08; опубл. 30.06.2010.

4. Установка для электротермической обработки проволоки: Патент на полезную модель № 696 МПК 7 С21D 1/40 – В. М. Константинов, А. С. Губанов, С. Н. Абраменко, М. В. Семенченко; заявитель УО «Полоц. гос. ун-т» № u 20020065; заявл. 05.03.02; опубл. 30.12.02.

5. Установка для диффузионного насыщения стальной проволоки: заявка ВУ а 20220105 / М. В. Семенченко.

ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРЫ ПОЛИАМИДА 6 В ПОЛИМЕРНЫХ ИЗДЕЛИЯХ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ FDM-ПЕЧАТИ

Скаскевич А. А., Гайдук А. Н.

*Гродненский государственный университет имени Янки Купалы,
г. Гродно, Республика Беларусь*

Производство полимерных изделий с применением аддитивных технологий стало доступным благодаря интенсивному развитию производства FDM-принтеров, а также расходных полимерных материалов (филаментов), что позволяет решать различные задачи производства. В Республике Беларусь активно и эффективно применяют алифатические полиамиды и композиты на их основе для производства конструкционных изделий с высокими значениями потребительских характеристик самого широкого назначения. При этом переработка полиамидов в изделия и реализация преимуществ и достоинств указанного термопластичного полимера при использовании различных технологий затрудняются высокими значениями гигроскопичности (до 12 мас.% при допустимом значении при переработке 0,05–0,1 мас.%) и термической усадки (до 2,5 % для ненаполненных материалов) полиамида 6. Для активного применения полиамида 6 в аддитивных технологиях это является существенным недостатком, влияющим на качество получаемых изделий. И если с высокой склонностью к влагопоглощению переработчики полиамида эффективно справляются за счет предварительной сушки сырья и применения подогрева материала в загрузочной зоне технологического оборудования, то термическая усадка связующего требует более сложных решений. Чаще всего снизить термическую усадку полиамидной матрицы удается за счет ее модифицирования полимерными компонентами, а также путем введения дисперсных и (или) волокнистых наполнителей. При этом стеклянные волокна в составе полиамида 6 позволяют существенно повысить уровень деформационно-прочностных параметров изделий, а углеродные волокна увеличить ударную вязкость и износостойкость. Полиамид 6 и композиты на его основе в основном перерабатывают в изделия методами литья под давлением благодаря высоким значениям параметра текучести расплава. Применение ПА6 для FDM-печати в изделия представляется затруднительным по причине высокой текучести расплава (ПТР ПА6 210/310 более 20 г/10 мин), в связи с чем перспективным является использование композиционных составов на его основе для 3D-печати [1].

Таким образом, цель работы состоит в изучении особенностей формирования структуры композитов на базе полиамида 6 в изделиях, полученных методом послойного наплавления.

Для изучения особенностей формирования структуры материала в изделиях, полученных методом 3D печати, в данной статье авторы использовали полиамид ПА6-210/310 (Гроднамид) ТУ РБ 500048054.009-2001 в гранулах произ-

водства ОАО «ГродноАзот», а также углепластик УПА6-10 ТУ РБ 00204056-086-94 в гранулах производства ОАО «СветлогорскХимволокно». Для изучения параметров полимерных изделий получали филамент диаметром 1,75 мм на лабораторном экструдера Z-7М (Россия) в режимах, учитывающих реологические характеристики исходных материалов.

Исследования структуры материалов проводили методом сканирующей электронной микроскопии на хрупко разрушенных образцах напечатанных изделий (таблица 1). Полученные результаты обрабатывали методами математической статистики с применением табличного редактора Microsoft Excel 2010.

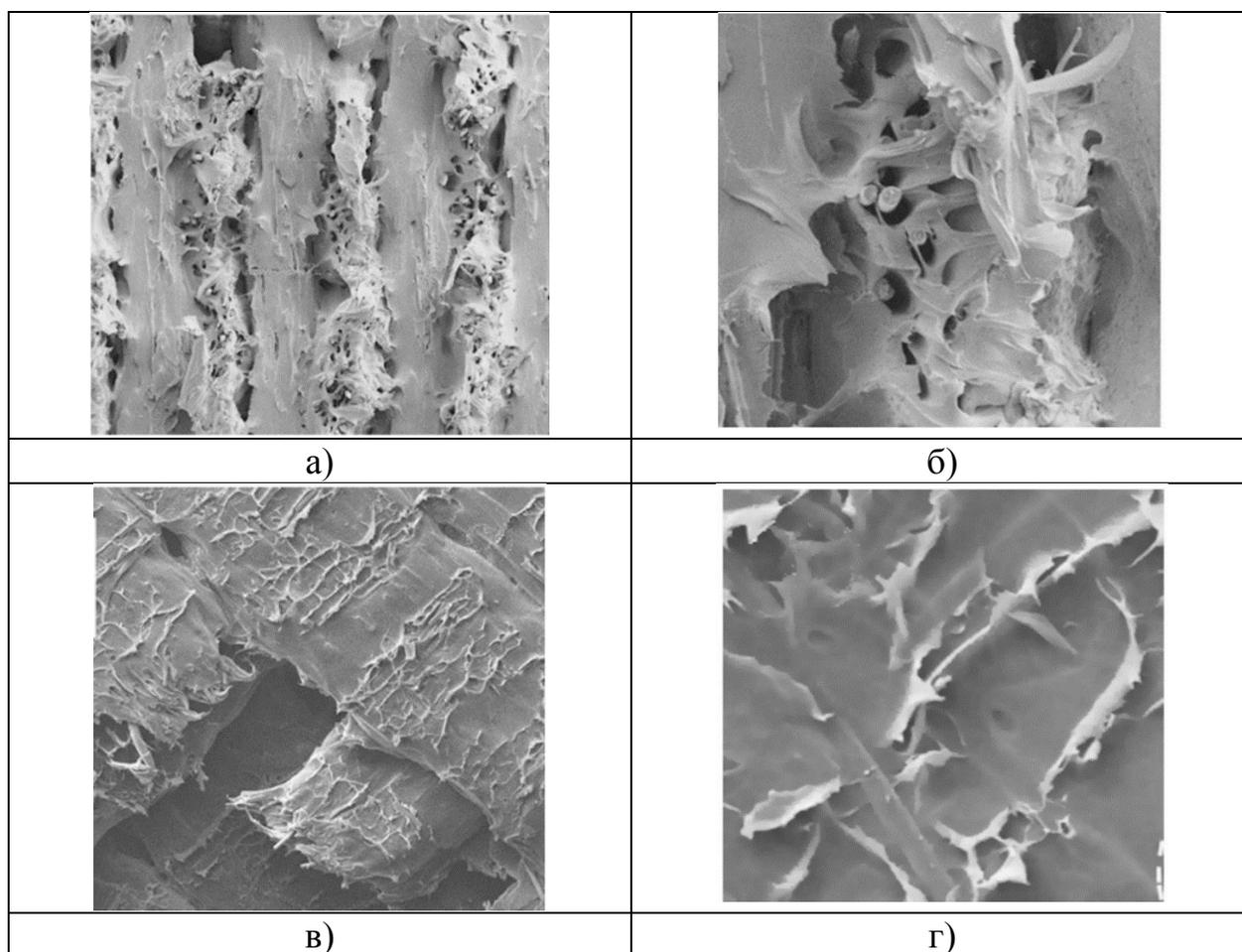
Таблица 1 – Параметры настроек печати исследуемых образцов

Основные параметры настройки печати	ПА 6	УПА 6–10
Скорость перемещения сопла экструдера при печати, мм/сек	40	20–60
Толщина слоя печати, мм	0,2	0,2
Ширина печати, мм	0,4	0,4
Количество слоев периметра изделия	6	6
Температура стола, °С	100	70
Температура экструзии, °С	250	250

Очевидно, полиамид 6 весьма чувствителен к технологическим условиям его переработки в изделия, что в процессах экструзии расплава в свободном состоянии проявляется в изменении геометрии изделия. Стабилизировать вязкостно-температурную зависимость материала при экструзии и последующей печати изделия можно за счет введения в состав ПА 6 наполнителей. Представляло интерес исследовать механизм формирования аутогезионных связей между слоями полимерного изделия при его изготовлении методом послойного наплавления. Полученные образцы полимерных изделий в виде лопаток с различным характером ориентации во внутрислоевом объеме ($\pm 45^\circ$ и $0^\circ/90^\circ$) были подвергнуты 5 % деформации при одноосном растяжении для дальнейшего исследования хрупких сколов образцов изделий, полученных в продольном оси растяжения направлении.

Проведен анализ морфологии поверхности хрупкого излома образцов лопаток на базе углепластика УПА 6/10, полученных FFF-печатью с ориентацией полимера $\pm 45^\circ$ внутри слоев при заполнении объема изделия, на РЭМ-изображениях поверхности, представленных на рисунке 1. Снимок поверхности образца в пределах межслоевого хрупкого скола показан на рисунке 1а, где видно несколько смежных слоев волокон с ориентацией печати в слое под углами $+45^\circ$ и -45° . На рисунке 1а можно выделить несколько важных морфологических особенностей разрушения полимерного связующего: пустоты между слоями, возникающие в результате процесса 3D-печати, слои с шероховатой морфологией поверхности разрушения и слои с более гладкой поверхностью. Для детального отображения характера контакта смежных слоев приведено увеличение области съемки (рисунок 1б). Представленные изображения свидетельствуют о том, что между нитями между слоями характерна недостаточная

адгезия вдоль оси растяжения, при котором происходит рост образовавшейся трещины. Также может быть отмечена шероховатая поверхность излома в межслоевой области, где отмечается фибрилляция полимерного связующего с образованием нитевидных фрагментов.



а) общий вид морфологии поверхности излома образца в межслоевой локации (увеличение $\times 100$); б) крупный план поверхностных элементов в смежных слоях (увеличение $\times 500$); в) общий вид морфологии поверхности излома образца во внутрислоевой локации (увеличение $\times 100$); г) крупный план поверхностных элементов в пределах слоя (увеличение $\times 500$)

Рисунок 1 – РЭМ-изображения поверхностей хрупкого излома образцов с ориентацией печати $\pm 45^\circ$

Представленный характер разрушения углепластика УПА 6/10 позволяет предполагать, что перпендикулярно ориентированные к оси растяжения слои связующего затрудняют рост трещин. При этом участие оставшихся слоев материала в механизме сопротивления разрушения матрицы можно считать незначительным из-за недостаточной адгезии между ними, обусловленной ограниченной подвижностью связующего полимера, наполненного углеродными волокнами [2, 3].

Также заметна роль коротких элементов углеродного волокна, содержащегося в матрице ПА6 в процессе деформационного разрушения слоистой струк-

туры изделия из углепластика. Фибриляция полимерной матрицы при одноосном растяжении угленаполненного образца ПА6 предполагает реализацию локального механизма упрочнения полимерной матрицы в изделии, сформированном методом FFF-печати.

При этом в пределах отпечатанного слоя наблюдается достаточно прочное аутогезионное сцепление во внутрислойной локации матрицы, наблюдаемое на изображении морфологии хрупкого излома образца (рисунок 1в). Это объясняется хорошими реологическими характеристиками ПА6, способствующими реализации явления аутогезии между нитями полимера в пределах печатаемого слоя. На рисунке 1г показано, что следы шероховатости поверхности излома сосредоточены вдоль коротких волокон. Такой факт подтверждает предположение о том, что короткие углеродные волокна способствуют усилению аутогезии в процессе FFF-печати полимерных изделий на основе углепластика.

Таким образом, результаты исследования указывают на перспективность проведения научных исследований в создании материалов на основе алифатических полиамидов и их композитов, а также изучения влияния технологических факторов процесса переработки полиамидных филаментов в изделия методом FDM-печати [4].

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Ревяко, М. М. Теоретические основы переработки полимеров : учеб. пособие для студентов по специальностям «Химическая технология органических веществ, материалов и изделий», «Упаковочное производство», «Машины и технология обработки материалов давлением» / М. М. Ревяко, Н. Р. Прокопчук. – Минск : БГТУ, 2009. – 305 с.

2. Межслойная аутогезия термопластичных материалов, применяемых в 3D-технологиях / А. В. Кравцевич [и др.] // Веснік Гродзенскага дзяржаўнага ўніверсітэта імя Я. Купалы. Серыя 6, Тэхніка. – 2017. – Т.7, №1. С. 66–74.

2. Tartakowski, Z. Właściwości mechaniczne wyrobów wytworzonych technologią FDM z poliamidu / Z.Tartakowski, K.Mydlowska // Przetwórstwo Tworzyw. – 2015. — № 6. P. 75–79.

3. Богданова, Ю. Г. Адгезия и ее роль в обеспечении прочности полимерных композитов : учеб. пособие / Ю. Г. Богданова. – М. : Изд-во МГУ имени М. В. Ломоносова, 2010. – 68 с.

4. Skaskevich, A.A. Influence of technological parameters of FDM-print on the strength characteristics of samples of polyamide / A. A. Skaskevich, A.Sudan, D.Dzhendov // Machines.Technologies.Materials. – 2020. – Т. XIV, № 5. – С. 210–212.

АНАЛИЗ РЕЖИМОВ ПОДАЧИ СМАЗОЧНО-ОХЛАЖДАЮЩЕЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ ПРИ РАСТАЧИВАНИИ ОТВЕРСТИЙ

Тихон Е. М.

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

В процессе механической обработки металлов на основные элементы технологической системы воздействуют силы, возникающие в результате деформирования срезаемого слоя металла и обрабатываемой поверхности детали. Также в процессе обработки возникают силы трения на поверхностях режущего инструмента. Применение смазочно-охлаждающей технологической среды (СОТС) снижает силы трения режущего инструмента, способствует эвакуации стружки и теплоотводу из зоны резания. Корректное применение СОТС повышает надёжность и производительность обработки, а также качество деталей.

Существует целый ряд аспектов применения СОТС, имеющих большое значение для процесса резания: тип СОТС, подвод СОТС к зоне резания, режим течения СОТС в пограничном слое. Режим течения СОТС особенно актуален для высокоскоростной обработки, когда отвод теплоты из зоны резания до 95 % обеспечивается сходящей стружкой и потоком смазочно-охлаждающей среды [1].

Режим течения в динамическом пограничном слое зависит от числа Рейнольдса Re и может быть: 1) ламинарным – слоистое течение без перемешивания частиц жидкости и без пульсации скорости и давления, все линии тока направлены параллельно; 2) турбулентным – течение, сопровождающееся интенсивным перемешиванием жидкости с пульсациями скоростей и давлений, наряду с основным продольным перемещением жидкости наблюдаются поперечные перемещения и вращательные движения отдельных объемов жидкости.

Переход к турбулентному режиму течения жидкости в пограничном слое определяется критическим значением числа Рейнольдса. Это обусловлено тем, что при возрастании скорости, участвующей в расчете числа Re , его значение растет. Таким образом, переход от ламинарного режима к турбулентному наблюдается при определенной скорости движения жидкости. Эта скорость называется критической [2].

Зависимость режима течения от значения числа Re :

$Re < 2100$ – Ламинарный режим,

$Re = 2100 - 2300$ – Переходный режим,

$Re > 2300$ – Турбулентный режим.

Рассчитаем число Рейнольдса для различных смазочно-охлаждающих технологических сред (таблица 1) при растачивании отверстия (рисунок 1) с тем, чтобы потоки СОТС способствовали интенсификации вывода стружки и теплоотводу из зоны резания [3].

При растачивании поток СОТС захватывается конструктивными элементами (режущей пластиной и корпусом) расточной головки. В этом случае линейная скорость СОТС принимается равной линейной скорости вращающегося инструмента.

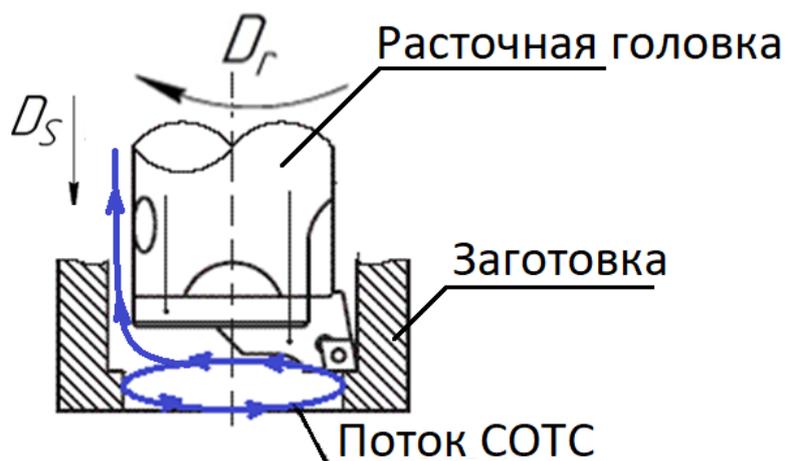


Рисунок 1 – Поток СОТС при растачивании

Таблица 1 – Физические свойства смазочно-охлаждающих технологических сред

Наименование	Коэффициент динамической вязкости	Плотность
	$\mu \cdot 10^{-3}, \text{Па} \cdot \text{с}$	$\rho, \text{кг} / \text{м}^3$
Вода	1,787	1000
Масло	5,6	890
Воздух	0,0182	1,293
Аргон	0,0223	1,78
Твердая СОТС (Литиевая)	2,5*	536*

* – при температуре плавления литиевой технологической среды, равной 900 °С.

Число Рейнольдса:

$$\text{Re} = \frac{L \cdot \rho \cdot W}{\mu},$$

где W – скорость среды;

L – линейный размер, $L = \sqrt{S / \pi} = 5,64 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ (S – площадь препятствия);

ρ – плотность;

μ – коэффициент динамической вязкости.

Значения числа Рейнольдса при увеличении скорости среды приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Число Рейнольдса для различных СОТС

W, м/мин	Re				
	Вода	Масло	Воздух	Аргон	Твердая среда
6	316	89	40	45	121
21	1105	314	140	158	423
36	1894	538	240	270	726
51	2683	762	341	383	1028
66	3472	986	441	495	1330

Вычислим критические скорости перемещения сред при переходе от ламинарного режима к турбулентному, при котором обеспечивается наиболее благоприятные условия теплоотвода. Примем число Рейнольдса равным 2300, результаты расчетов представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Критическая линейная скорость для различных СОТС (м/мин)

Вода	Масло	Воздух	Аргон	Твердая среда
43	153	344	306	114

Значения числа Рейнольдса и критической скорости для воды при различной площади препятствия S (линейного размера L) приведены в таблицах 4 и 5.

Таблица 4 – Число Рейнольдса для воды при различных препятствиях

W, м/с	Re (L1 = 2,5мм)	Re (L2 = 3,57мм)	Re (L3 = 4,47мм)	Re (L4 = 5,64мм)
0,1	140	200	250	316
0,35	490	700	875	1105
0,6	840	1200	1500	1894
0,85	1190	1700	2126	2683
1,1	1540	2200	2752	3472

Таблица 5 – Критическая скорость потока воды при различных различной площади препятствия

	L1	L2	L3	L4
Wкр, м/мин	98,6	69	55	43

Заключение

Рекомендуемые значения линейной скорости СОТС, обеспечивающие турбулентный режим и наилучшее охлаждение зоны высокоскоростного резания, минимальны для воды и масла. При использовании воздуха и газовой среды требуются большие значения линейной скорости. Твердая среда обеспечивает эффективное охлаждение при небольших значениях скоростей. Полученные результаты показывают, что с увеличением площади препятствия скорость СОТС уменьшается. Чтобы потоки СОТС способствовали интенсификации вывода стружки и теплоотводу из зоны резания, рекомендуется увеличить препятствие потоку.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Худобим, Л. В. Смазочно-охлаждающие технологические средства и их применение при обработке резанием: справочник / Л. В. Худобин, А. П. Бабичев, Е. М. Булыжев. – М. : Машиностроение. – 2006. – 544 с.
2. Энтелис, Э. М. Смазочно-охлаждающие технологические средства для обработки металлов резанием: справочник / С. Г. Энтелиса, Э. М. Берлинера. – М. : Машиностроение. – 1986. – 352 с.
3. Моделирование и регулирование стружкообразования и потоков смазочно-охлаждающей технологической среды при фрезеровании / Н. Н. Попок [и др.] //

УДК 621.791

ТЕХНОЛОГИЯ ДУГОВОЙ СВАРКИ С ВВЕДЕНИЕМ МОДИФИЦИРУЮЩИХ ГАЗОВЫХ КОМПОНЕНТОВ В ЗАЩИТНУЮ АТМОСФЕРУ

Фетисова Е. А., Коротеев А. О., Коротеева А. А.

*Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования
«Белорусско-Российский университет»,
г. Могилев, Республика Беларусь*

В настоящее время актуальной задачей при изготовлении конструкций является снижение их металлоемкости при сохранении требуемого уровня показателей пластичности, пределов прочности и текучести материала. Это является эффективным как с технической, так и с экономической точки зрения. Достичь такого эффекта можно путем применения современных высокопрочных сталей, сочетающих в себе необходимый уровень эксплуатационных характеристик благодаря специальным системам легирования.

При изготовлении изделий из таких материалов актуальным вопросом становится технология их сварки. Известно, что чем сложнее система легирования стали, тем более чувствителен материал к влиянию термического цикла на свойства и структуру сварного соединения, а также к возникновению ряда дефектов, обусловленных высокими значениями внутренних напряжений, сопоставимых с пределом текучести. В связи с этим технология сварки должна иметь возможность воздействия на микроструктурное состояние металла и управления тепловлажением в основной материал.

Одним из распространенных дефектов, которым подвержены сварные соединения, выполненные из высокопрочных сталей, являются так называемые «холодные» трещины, которые возникают и развиваются по механизму замедленного разрушения. Их образованию способствует охрупчивание материала из-за диффузионного водорода, обладающего подвижностью, вплоть до комнатной температуры. Будучи в металле в растворенном состоянии, водород с легкостью диффундирует в области с наименьшей концентрацией. Как правило, это линия сплавления, околошовная зона и внутренние субкристаллические несплошности, а также макроскопические дефекты. По результатам такого перемещения количество водорода в зоне термического влияния может как увеличиваться, так и уменьшаться, в зависимости от условий протекания процесса, что приводит к внутренним напряжениям. Кроме того, попадая в указанные области, водород теряет диффузионную подвижность в результате образования его молекулярной формы, резко повышающей внутреннее давление и способствующей развитию и раскрытию локальных разрушений в виде трещин. Также

диффузионная подвижность практически полностью теряется в случае наличия структур мартенсита и бейнита, обеспечивающих основной механизм упрочнения стали. Все эти факторы отрицательно влияют на сопротивляемость металла разрушениям.

При производстве сварных конструкции одним из методов борьбы с образованием «холодных» трещин является снижение содержания водорода в металле шва. Наиболее эффективным при этом является его связывание в химически стойкие, нерастворимые в металле при высоких температурах, соединения фтористого водорода. В сварочной практике решения для реализации такого мероприятия находят в применении фтористо-кальциевой основы в составе флюсов и электродных покрытий, а также в сердечниках порошковых проволок.

В современном производстве в качестве сварочного присадочного плавящегося материала при дуговой сварке в защитных газах используют проволоку сплошного сечения. В таких условиях использование указанного выше компонента вызывает ряд технических сложностей. Предлагаемая нами технология основывается на модификации защитной атмосферы газообразными галоидными компонентами, содержащими в своем составе фтор. При выборе таких соединений особое внимание уделяли доступности и нетоксичности при нормальных условиях. Наиболее известным и практически применимым в рассматриваемых условиях является гексафторид серы SF_6 . Особенностью таких соединений является способность к диссоциации при высоких температурах с образованием свободных соединений фтора. Кроме этого, гексафторид серы обладает высоким потенциалом ионизации, что приводит с одной стороны к сжатию столба дуги и затруднению существования дугового промежутка, с другой стороны – к увеличению глубины проплавления основного металла.

Важно отметить, что функциональная модификация защитной газовой среды является одним из эффективных способов воздействия на металлургические и физико-химические процессы при сварке, что дает возможность управления и контроля микроструктурного состояния материала.

Нами были проведены экспериментальные исследования с использованием роботизированного комплекса Fanuc ARC Mate 100iC с источником питания Fronius TPS 3200 с целью подтверждения эффективности практического применения предлагаемой технологии. В качестве защитной атмосферы была выбрана смесь на основе аргона и углекислого газа 82 % Ar + 18 % CO_2 . Гексафторид серы SF_6 вводили в зону горения дуги в количестве от 1 % до 5 %. Эксперименты заключались в наплавке валиков на пластины из низкоуглеродистой низколегированной стали 09Г2С присадочной сварочной проволокой сплошного сечения Св-08Г2С. При этом соотношение Ar и CO_2 сохранялось в указанной выше пропорции при общем расходе защитной газовой смеси 12...15 л/мин.

Для получения требуемого состава и процентного соотношения трехкомпонентной защитной газовой атмосферы Ar + CO_2 + SF_6 использовалась смесь последовательного смешивания, для реализации которой была разработана специальная установка, представленная на рисунке 1.



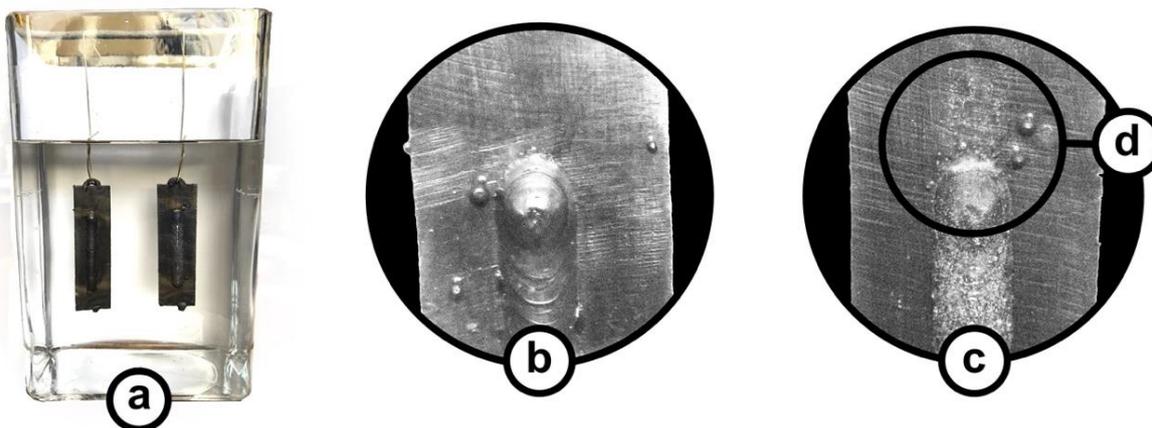
Рисунок 1 – Установка для смешивания трехкомпонентной защитной газовой среды

Традиционная защитная газовая смесь Ar (82 %) + CO_2 (18 %) получалась при помощи смесителя Witt BM-2M, который подключали к баллонам с аргоном и углекислым газом. Контроль расхода защитной газовой смеси производился поплавковым ротаметром LZB-10. С помощью редуктора через проводящие газ шланги к ротаметру LZB-3 подключался баллон с гексафторидом серы. Имеющиеся на установке манометры контролировали входное давление смеси Ar + CO_2 и SF_6 .

В ходе работ нами была проведена качественная оценка влияния содержания SF_6 в составе защитной газовой атмосферы на количество содержания водорода в наплавленном металле. Для этого образцы после наплавки погружали в емкость с глицерином. Оценке были подвержены образцы, выполненные по традиционной технологии в среде защитной газовой смеси Ar (82 %) + CO_2 (18 %) и с введением SF_6 [1].

Установлено, что поверхность наплавки, полученной с использованием защиты Ar (82 %) + CO_2 (18 %) покрыта газовыми пузырьками, что говорит о наличии большого количества диффузионного водорода в металле. Минимальное присутствие газовыделений на образцах, полученных с использованием трехкомпонентной смеси Ar + CO_2 + SF_6 , позволяет подтвердить предположение о качественном снижении водорода в материалах в десятки раз. На рисунке 2 представлены результаты качественной оценки содержания водорода в наплавленном металле [2].

Снижение количества выделившихся газовых пузырьков в образцах говорит о способности гексафторида серы образовывать нерастворимые в наплавленном металле стабильные химические соединения фтористого водорода (HF) при его диссоциации от высокотемпературного воздействия сварочной дуги в процессе сварки и наплавки.



*a – колба с образцами; b – образец наплавленный с введением в защитную атмосферу SF₆;
c – образце наплавленный по традиционной технологии (в среде Ar+CO₂); d – выделившийся
водород в виде сплошного потока всплывающих с поверхности наплавки пузырей*

Рисунок 2 – Качественная оценка насыщаемости водородом образца наплавки при помощи глицериновой пробы

Таким образом, разработанная нами технология позволяет снизить вероятность образования дефектов в сварных соединениях, возникновению которых способствует водород.

Кроме этого, в ходе проведения исследований было установлено, что введение в состав защитной атмосферы Ar (82 %) + CO₂ (18 %) гексафторида серы оказывает влияние на характер и частоту переноса электродного металла.

Таким образом, проведенные исследования говорят о возможности практического применения разработанной технологии дуговой сварки с модифицированием защитной газовой атмосферы галоидными соединениями, которая позволит повысить качество сварных соединений и производительность процесса сварки, путем управления металлургическими процессами и контроля микроструктуры материалов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Фетисова, Е.А. Влияние гексафторида серы в составе газовой защитной атмосферы при дуговой сварке на содержание водорода в наплавленном металле / Е. А. Фетисова, А. О. Коротеев, В. П. Куликов // *Материалы, облрудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Междунар. науч.- техн. конф. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2021. – с 174.*

2. Фетисова, Е. А. Особенности металлургических процессов при дуговой сварке с модификацией защитной газовой атмосферы галоидными соединениями / Е. А. Фетисова, А. О. Коротеев, А. А. Коротеева // *Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2022. – № 1. – С. 87–96.*

ЭЛЕКТРОННО-СТИМУЛИРОВАННОЕ ОСАЖДЕНИЕ ГИДРОГЕНИЗИРОВАННОГО АЛМАЗОПОДОБНОГО УГЛЕРОДА

Чекан Н. М., Акула И. П., Сергеенко С. Е., Шнак Е. П.

Физико-технический институт НАН Беларуси,

г. Минск, Республика Беларусь

Введение

В настоящее время большой интерес проявляется к покрытиям алмазоподобного углерода (АПУ). Такие покрытия, осажденные на различные подложки, могут использоваться в качестве абразивных материалов, теплоотводов полупроводниковых приборов, пассивирующих и изолирующих пленок, покрытий оптических деталей, износостойких покрытий на инструменте, триботехнических покрытий в прецизионных узлах трения, защитных покрытий на магнитных дисках и головках устройств хранения информации, коррозионностойких покрытий [1]. Широкое применение они находят в производстве медицинских имплантатов в качестве биосовместимых покрытий [2].

Для получения алмазоподобных покрытий используются два основных высокоэнергетических метода. При физическом осаждении из газовой фазы (PVD метод) в качестве источника углерода выступает графитовая мишень [3]. Ее испарение лазером или катодной дугой либо магнетронное распыление дает возможность конденсировать на обрабатываемой поверхности очень твердые и химически инертные покрытия, которые не содержат в своем составе водород. По причине высоких внутренних напряжений в покрытии и малой адгезии к основе, низких скоростей роста, содержания большого количества макрочастиц модифицированного графита лазерный и катодно-дуговой методы имеют ограниченное применение. Малое количество sp^3 -связанных атомов углерода и низкая твердость покрытий также ограничивают применение магнетронного распыления.

Существенно более распространенным методом является плазмостимулированное химическое осаждение из газовой фазы (PECVD-метод). В этом методе, как правило, используется радиоизлучение на частоте 13,56 МГц для создания плазмы в среде газообразных углеводородов [4]. В этом случае обеспечивается высокая скорость синтеза АПУ покрытий, которые обладают гладкой поверхностью и высокой химической стойкостью, но в то же время, сравнительно малой твердостью и содержат большое количество водорода (до 35 ат.%).

Для реализации двух этих методов требуются либо дорогостоящие источники углеродной плазмы, сложные системы их питания и управления, как в случае PVD-метода, либо отдельные специализированные дорогостоящие вакуумные установки для PECVD-метода с ограниченным заполнением рабочего пространства вакуумной камеры из-за необходимости поддержания необходимой конфигурации реакционного пространства для устойчивого горения ВЧ-разряда.

Значительная потребность в АПУ покрытиях для целого ряда изделий практически во всех отраслях промышленности из-за их уникальных свойств требует новых подходов к техническому и технологическому обеспечению их полу-

чения, в том числе на базе широко распространенных вакуумных систем для осаждения износостойких покрытий на инструментах, деталях машин и механизмов, к примеру, таких как TiN, TiAlN, CrAlN.

В настоящей работе используется «штатное» оборудование для катодно-дугового осаждения покрытий с некоторой модификацией для демонстрации его возможностей получения алмазоподобных углеродных покрытий новым методом электронностимулированного химического осаждения из газовой фазы (EECVD – Electron Enhanced Chemical Vapor Deposition).

Методы исследований покрытий

Плавающий потенциал экрана относительно земли определялся с помощью цифрового мультиметра Mastech MY64 с погрешностью $\pm(0,7\% + 2D)$. Толщина осажденного АПУ покрытия определялась по высоте "ступеньки", образованной после удаления маскирующего слоя с поверхности образца-свидетеля, на микроскопе МИИ-4, принцип действия которого основан на явлении интерференции света. Для получения двух систем волн, способных интерферировать, пользуются разделением пучка лучей, исходящих из одной точки источника света, на два пучка. Химический состав и состояние поверхности сформированных на кремниевой подложке покрытий были исследованы при помощи методов электронной микроскопии на сканирующем электронном микроскопе MIRA3 LMN компании Tescan с безазотным энергодисперсионным спектрометром X-MAX компании Oxford Instruments. Твердость покрытий на кремнии определялась методом индентирования на приборе ПМТ-3М с использованием алмазного наконечника Кнупа. Так как толщина осажденных на кремний покрытий не превышала 1 мкм, то для минимизации влияния основы на результаты измерений величина нормальной нагрузки на наконечник составляла 5 г. Время выдержки в нагруженном состоянии – 12 с. Трибологические испытания образцов стали 12Х18Н10Т с АПУ покрытием выполнялись на компьютеризированном стенде схеме "палец-диск" с использованием в качестве контр-тела сферы $\varnothing 5,15$ мм из стали ШХ15 при нормальной нагрузке 1 Н и скорости вращения образца 80 об/мин. Перед началом каждого испытания производилась калибровка датчика бокового усилия (датчика силы трения) методом статического нагружения.

Обоснование метода электронно-стимулированного осаждения алмазоподобных покрытий

Спектроскопические и зондовые исследования показывают, что плазма, генерируемая дугой на катоде из титана при токе 80 А, состоит в основном из двух- (90 %) и однократно (5 %) ионизированных частиц титана. Имеется также небольшое количество возбужденных нейтральных атомов [5]. Высокая средняя кратность ионизации $Q_z = 1,9$ обеспечивает значительное содержание электронов в плазме. В работе [5] установлено, что в зоне осаждения покрытий для титановой плазмы плотность электронных компонентов титановой плазмы составляет $9 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$. Это значение превышает приблизительно на два порядка значения электронной составляющей плазмы тлеющего разряда [6], т. е. катодная дуга является мощным источником электронов. Диагностика плазмы с помощью зондов Легмюра показывает, что распределение электронов по энергиям подчиняется распределению, близкому к распределению Максвелла-Больцмана с макси-

мумом около 10 эВ и имеет широкую ниспадающую полосу до 40 эВ [7]. Для широко применяемого в тонкопленочной технологии получения АПУ покрытий ацетилена энергия диссоциации на фрагменты Н-С≡С и Н составляет 5,7 эВ, на фрагменты Н-С и С-Н – 9,9 эВ, – С≡С – 15,3 эВ [8]. Измеренная экспериментально энергия ионизации молекулы ацетилена составляет величину около 13 эВ [9]. Это означает, только высокоэнергетическая часть электронов титановой плазмы способна воздействовать на газ-прекурсор при формировании углеродного покрытия. Если исходить из экспериментально полученной функции распределения электронов плазмы титана по энергии, показанной на рисунке 1 [7], то ее численное интегрирование от 6 эВ до 40 эВ, отнесенное к интегрированию от 0 эВ до 40 эВ, дает значение 0,87, то есть около 90 % общего количества электронов способны производить эффективную активацию ацетилена. При этом около 39 % электронов способны вызывать ионизацию молекул и радикалов углеводородов. Этот процесс является критически важным для формирования алмазоподобных покрытий. Именно наличие ионов дает возможность повысить энерговклад в процесс конденсации путем подачи необходимого потенциала смещения на основу и тем самым обеспечить необходимые условия для формирования алмазоподобного углерода [8].

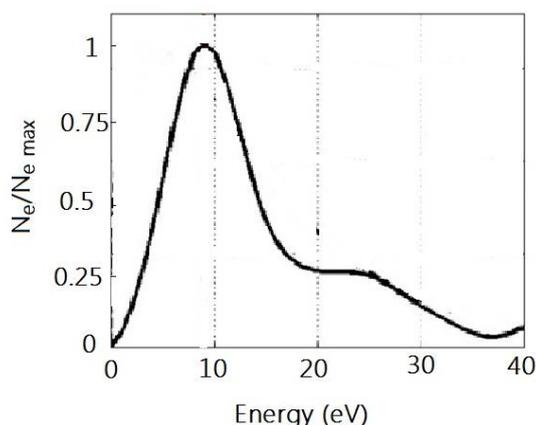


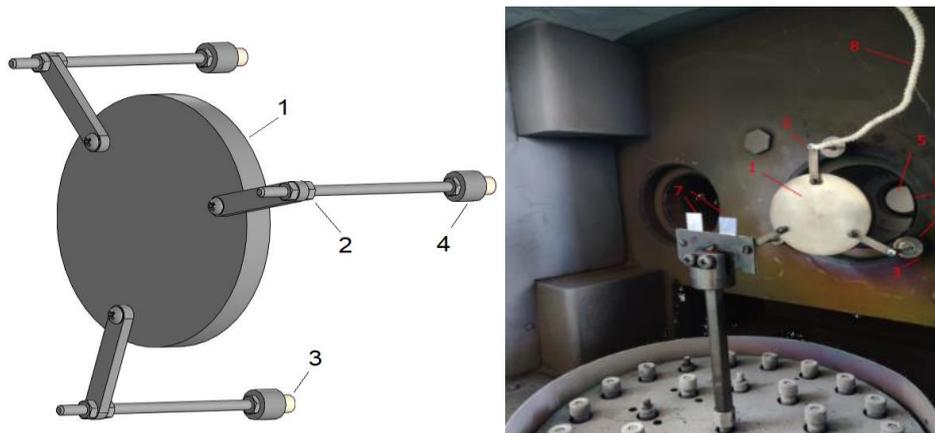
Рисунок 1 – Функция распределения электронов плазмы катодно-дугового разряда на мишени по энергии из титана при токе 100 А [7]

Таким образом, следует ожидать, что электронная составляющая титановой плазмы обладает достаточной энергией для формирования нелетучих радикалов и ионов в среде ацетилена и будет вызывать конденсацию углеродного покрытия на подложке в виде алмазоподобного углерода при условии дополнительной энергетической активации.

Устройство и его основные характеристики для реализации метода ЕЕСVD

Главной проблемой в реализации нового метода получения АПУ покрытий является выделение электронной составляющей из титановой плазмы и исключение попадания ионов и нейтральных атомов титана в зону осаждения покрытий. Наиболее простым решением является использование механического экрана, расположенного недалеко от выхода источника плазмы, как показано на рисунке 2. Для данной серии экспериментов экран представлял собой массивную

металлическую пластину с размерами $\varnothing 100 \times 10 \text{ мм}^2$, изготовленную из немагнитной аустенитной стали 12X18Н10Т (1). Выбор материала коллектора обусловлен высокими температурами (порядка $600 \text{ }^\circ\text{C}$) в потоке плазмы, а также минимальным воздействием на конфигурацию магнитных полей магнитооптической системы установки УНИПА-1-001. Экран крепился к корпусу вакуумной камеры через керамические изоляторы (3), защищенные от попадания продуктов эрозии катода специальными колпачками (4). Регулировочные гайки (2) использовались для юстировки позиционирования экрана относительно анода дугового источника титановой плазмы.



1 – экран; 2 – юстировочная гайка; 3 – керамический изолятор; 4 – защита изолятора;
5 – Ti катод; 6 – выход анодного узла; 7 – подложки;
8 – изолированный провод для определения потенциала на экране

Рисунок 2 – Конструкция экрана катодно-дуговой плазмы и его расположение в вакуумной камере

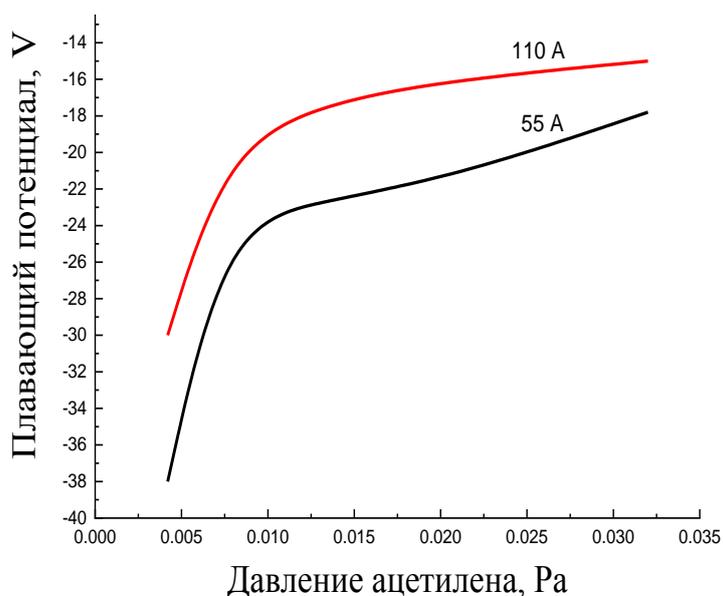


Рисунок 3 – Зависимость плавающего потенциала от давления ацетилена для тока дуги 55 А и 110 А

При изоляции экрана от корпуса вакуумной камеры на нем возникает отрицательный плавающий потенциал φ , как на любом объекте, помещенном в плазму. При этом его значение сильно зависит от давления реакционного газа, как это можно видеть из рисунка 3. Для условий, близких к вакуумным, φ имеет довольно большие значения порядка -40 В для тока дуги 55 А и -30 В для 110 А . Можно видеть, для более высо-

кого значения тока дуги плавающий потенциал меньше, что может быть обусловлено существенно более высокой концентрацией заряженных частиц в плазме, приводящей к малому радиуса экранирования, и более быстрой нейтрализацией положительными ионами накапливаемого отрицательного заряда за счет сорбции экраном электронов плазмы. С возрастанием давления примерно до 0,01 Па значение φ резко уменьшается по абсолютной величине в 1,7 раза и далее стабилизируется на уровне -20 В и -16 В для тока дуги 55 А и 110 А соответственно. Температура ионов дуги, горящей на катоде из титана, исследовалась неоднократно и составляет приблизительно 7500 К [5], что соответствует энергии около 1 эВ, которая значительно меньше абсолютного значения потенциала экрана. Это в свою очередь означает, что экран будет являться эффективным коллектором ионов титана, в то время как основной поток электронов будет обтекать экран и входить в вакуумную камеру без существенных потерь благодаря его отрицательному заряду.

Эксперименты по получению углеродных покрытий проводились при минимальном токе горения дуги 55 А во избежание перегрева экрана. В таблице 1 представлены условия получения углеродных покрытий. В качестве основы использовались пластины полированного электротехнического кремния и нержавеющей стали 12Х18Н10Т. Предварительно поверхность основы обрабатывалась ускоренными ионами аргона в течении 30 минут для удаления загрязнений и химической активации. В качестве катода использовался титан ВТ-1-0 с чистотой 99 %. Для стабильного горения катодно-дуговой плазмы в вакуумную камеру подавался аргон при давлении порядка $4,2 \times 10^{-3}$ Па. Варьируемым параметром в диапазоне $-(70-170)$ В выступало напряжения смещения, которое прикладывалось к держателю основы.

Таблица 1 – Условия получения углеродных покрытий

№ эксп.	Ток горения дуги, А	Давление C_2H_2 , Па	Время осаждения, мин	Напряжение смещения, В	Толщина покрытия, мкм
1	55	$1,3 \times 10^{-2}$	15	-70	1,5
2				-120	0,6
3				-170	0,5

Толщина сформированных покрытий составила порядка (0,5–1,5) мкм и находилась в нелинейной зависимости от потенциала смещения. Вероятно, рост напряжения смещения на основе приводит к частичному распылению ранее осажденного покрытия за счет большей энергии соударения ионов углерода с поверхностью.

Эффективность работы экрана проверялась по наличию либо отсутствию частиц титана в осаждаемом углеродном покрытии. Результаты исследования элементного состава для образца № 1 представлены на рисунке 4. Для образцов № 2 и № 3 полученные спектры имеют аналогичный вид. Энергодисперсионные спектры химических элементов снимались с указанных на рисунке 4а двух участков. В таблице 2 представлены данные по составу осажденного покрытия.

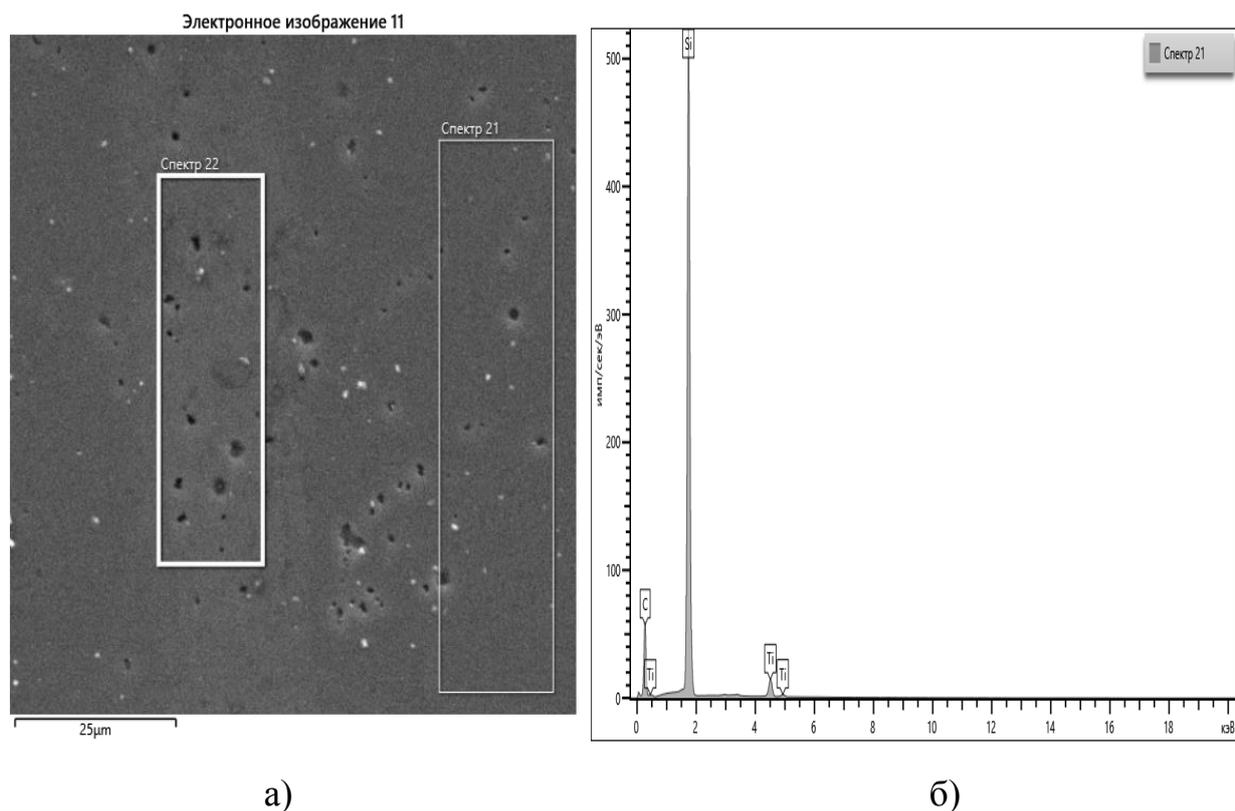


Рисунок 4 – Поверхность (а) и энергодисперсионные спектры химических элементов (б) углеродного покрытия №1 на основе из кремния

Таблица 2 – Состав покрытия (ат.%)

Химический элемент	Спектр 1	Спектр 2	Среднее значение
C	76,51	76,39	76,45
Si	22,22	22,34	22,28
Ti	1,27	1,70	1,48

Можно видеть, что энергии электронного зондирующего пучка достаточно, чтобы получить сигнал от материала подложки – кремния, это свидетельствует о том, что химический состав покрытия был получен со всей его толщины. Основным элементом покрытия являлся углерод. Без учета кремния его относительное содержание составляло 98,1 ат.%. Содержание титана в покрытии не превышает 2 ат.%. Как видно из рисунка 4а, участок поверхности покрытия, с которого был получен спектр 2, содержит большее количество светлых точек, которыми являются макрочастицы титана, которые, по-видимому, являются источниками титана в покрытии. Несмотря на наличие экрана, небольшое количество макрочастиц субмикронных размеров попадает в область осаждения покрытий. Это происходит главным образом из-за многократного отражения этих частиц экраном и стенками камеры. Для уменьшения содержания примеси в углеродном покрытии необходимо предпринимать дополнительные меры защиты. Результаты исследования твердости полученных АПУ покрытий представлены на рисунке 5. Для сравнения приведена твердость основы без покрытия. Можно видеть, что углеродные покрытия, полученные новым способом осаждения, обладают очень высокими значениями микротвердости, характерными

для алмазоподобных углеродных материалов [9]. Исходя из способа получения, методом разложения углеводородов в их состав, несомненно, будет входить водород, который не определяется использованными методами микросондовой энергодисперсионной спектроскопии. Учитывая это и принимая во внимание значение твердости полученные углеродные материалы, можно отнести ко второму типу АПУ покрытий – тетраэдрическому аморфному гидрогенизированному углероду (ta-C:H) [10].

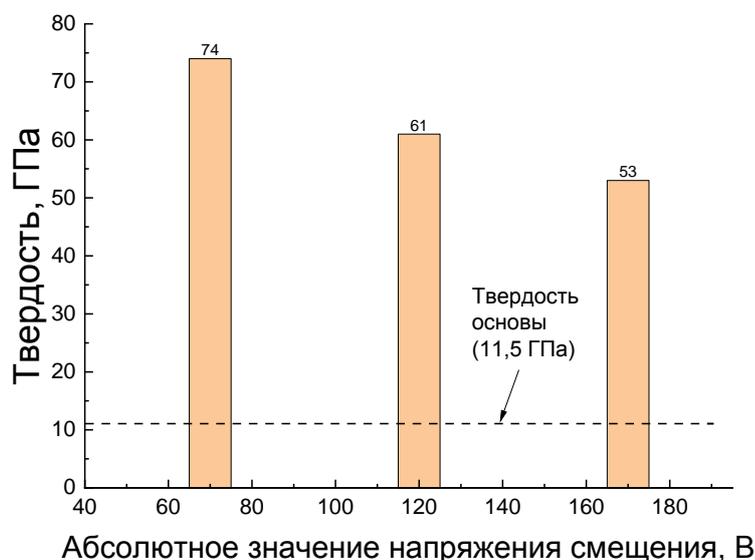


Рисунок 5 – Твердость АПУ покрытий на кремнии

Напряжение смещения, как и следовало ожидать из особенностей метода, обсужденных в разделе 3, является фак-

тором, оказывающим сильное влияние на твердость покрытия. Его возрастание от -70 В до -170 В приводит к снижению твердости с 74 ГПа до 53 ГПа. Очевидно, слишком высокое значение этого параметра приводит к перегреву конденсируемого покрытия, сопровождаемому графитизацией. Остается открытым вопрос о его оптимальном значении.

Трибологические испытания показали, что АПУ покрытия обладают низким устойчивым после приработки в течение 40 минут коэффициентом трения без использования смазки порядка 0,15–0,2 (рисунок 6), значения которого характерны для АПУ покрытий [11]. При этом рост напряжения смещения на кремниевой подложке приводит к снижению первоначального значения коэффициента трения и времени приработки в среднем в 1,5 раза. Вероятно, такое поведение связано с процессами притирки для поверхностей покрытий с различной твердостью, как это следует из диаграммы рисунка 5. Для покрытий, полученных при более высоких значениях напряжения смещения, график коэффициента трения имеет вид, близкий к плато.

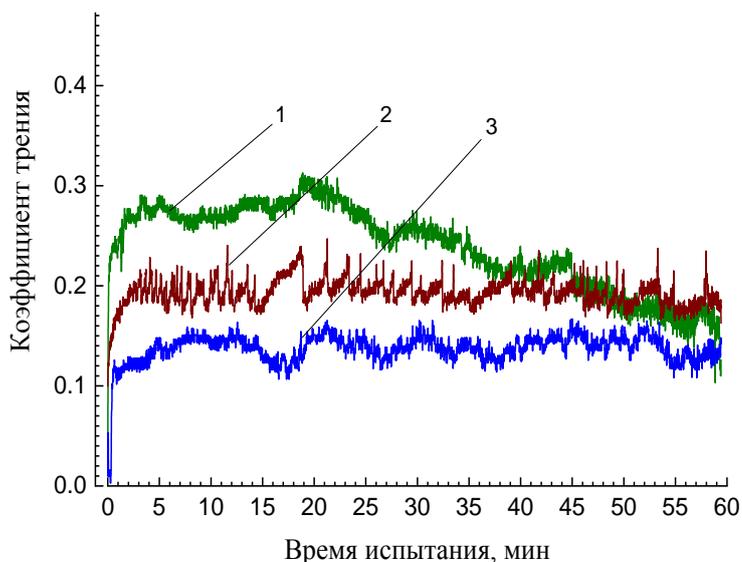


Рисунок 6 – Коэффициент трения АПУ покрытий для различных значений напряжения смещения: (1) -70 В, (2) -120 В, (3) -170 В

Заклучение

Обоснована возможность простого в своей аппаратной реализации способа получения алмазоподобных углеродных покрытий при взаимодействии электронной составляющей плазмы катодно-дугового разряда с газообразными углеводородами, как показано на примере ацетилена. Способ может быть реализован на вакуумных установках, оснащенных катодно-дуговыми испарителями металла с установкой экрана-коллектора ионов металлов. Новый способ относится к электронно-активируемому химическому осаждению из газовой фазы (Electron Enhanced Chemical Vapor Deposition – EECVD). Первые эксперименты показали, что получаемые покрытия относятся ко второму типу АПУ материалов – $ta-C:H$. Они обладают гладкой поверхностью, имеют твердость порядка 70 ГПа и характеризуются низким коэффициентом трения на уровне 0,15–0,20.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Bewilogua, K. History of diamond-like carbon films – From first experiments to worldwide applications / K. Bewilogua, D. Hofmann // *Surface and Coatings Technology*. – 2014. – Vol. 242. – P. 214–225.
2. Hauert, R. An overview on diamond-like carbon coatings in medical applications / R. Hauert, K. Thorwarth, G. Thorwarth // *Surface and Coatings Technology*. – 2013. – Vol. 233. – P. 119–130.
3. Vetter, J. 60 years of DLC coatings: Historical highlights and technical review of cathodic arc processes to synthesize various DLC types, and their evolution for industrial applications / J. Vetter // *Surface and Coatings Technology*. – 2014 – Vol. 257 – P. 213–240.
4. Wasy, A. Deposition of diamond-like carbon coatings: Conventional to non-conventional approaches for emerging markets / A. Wasy, M. Birkett // *Ceramics International*. – 2021. – Vol.47, N20. – P. 28075–28085.
5. Kuakowska-Pawlak, B. Plasma parameters in some industrial vacuum arc deposition systems / B. Kuakowska-Pawlak, J. Walkowicz, W. Zyrnickia, J. Smolik // *Vacuum*. – 2005. – Vol. 78. – P. 59–66.
6. Taylor W. S. Characterization of a glow discharge plasma as a function of sampling orifice potential / W. S. Taylor, J. G. Dulak, and S. N. Ketkar // *Journal of Mass Society of Mass Spectroscopy*. – 1990 – Vol. 1 – P. 448–454.
7. Andruczyk, D. Langmuir probe study of a titanium pulsed filtered cathodic arc discharge / D. Andruczyk, R.N. Tarrant, B.W. James, M.M.M. Bilek and G.B. Warr. *Langmuir* // *Plasma Sources Science Technology*. – 2006. – Vol. 15. – P. 533–537.
8. Kent, M. E. Bond strengths in etylene and acetylene / M. E. Kent., S. Cronert, S. E. Barrow, M. K Gilles, A. G. Harrison, V. M. Bierbaum, C. H. Depuy, W. C. Lineberger, G. B. Ellison // *Journal of American Chemical Society* – 1990. – Vol. 112. – P. 5750–5759.
9. Collin, J. E. Ionization of acetylene and its electronic energy levels / J. E. Collin, J. Delwiche // *Canadian Journal of Chemistry* – 1967. – Vol. 45, N16. – P. 1883–1889.
10. D. K. Rajak. Diamond-like carbon (DLC) coatings: Classification, properties, and applications / D. K. Rajak, A. Kumar, A. Behera and, P. L. Menezes // *Applied Sciences*. – 2021. – Vol. 11, N 10. – P. 4445.
11. Al Mahmud, K.A.H. An updated overview of diamond-like carbon coating in tribology / K.A.H Al Mahmud, M.A. Kalam, H.H. Masjuki, H.M. Mobarak, and N.W.M. Zulkifli // *Critical reviews in solid state and materials sciences*. – 2015. – Vol. 40, N 2. – P. 90–118.

**ИНЖЕНЕРИЯ ПОВЕРХНОСТИ.
СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ РАСЧЕТА
ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ
И НАПРЯЖЕНИЙ**

ТЕМПЕРАТУРНОЕ ПОЛЕ В НОЖЕ ГИЛЬОТИННЫХ НОЖНИЦ ПРИ ДЕЙСТВИИ ДВИЖУЩЕГОСЯ НОРМАЛЬНО-КРУГОВОГО ИСТОЧНИКА НАГРЕВА

*Веремейчик А. И., Хвисевич В. М., Холодарь Б. Г.
Брестский государственный технический университет
г. Брест, Республика Беларусь*

В реальных условиях работы элементы кузнечно-прессового оборудования подвергаются воздействиям агрессивной среды, механическим усилиям. Для повышения надежности и долговечности таких деталей используются различные методы. Анализ литературных источников и ряд проведенных экспериментов позволяют выделить из существующих способов термообработки поверхностную закалку с помощью плазменной струи, применение которой позволяет реализовать процесс упрочнения детали на заданную глубину, сохраняя сердцевину с исходными свойствами.

При плазменном поверхностном упрочнении используется действие движущихся концентрированных источников энергии, создающих направленную высокотемпературную газовую струю, тепловой поток которой и является главным действующим фактором процесса. Поверхностная закалка стальной детали связана с изменением фазовой структуры материала и созданием в нем мартенситной структуры с мелким размером зерна. Для обеспечения этого процесса производится нагрев материала до температур, превышающих температуру точки фазового превращения, определяемой содержанием углерода и других компонентов сплава, с последующим быстрым охлаждением. Скорость процесса охлаждения является фактором, существенно влияющим на результат термообработки, – ее увеличение способствует созданию более дисперсной мелкозернистой структуры материала, и, соответственно, более мелких по размерам дефектов и более высоких показателей твердости и износостойкости [1, 2]. В связи с наличием движения струи вдоль поверхности обрабатываемой детали величина достигаемой температуры разогрева материала и величина скорости охлаждения его после прохода струи оказываются жестко связанными, особенно в случае, когда дополнительные мероприятия по интенсификации процесса охлаждения не предпринимаются. Процессы нагрева и охлаждения зависят от интенсивности теплового потока q , коэффициентов теплопроводности λ материала и скорости движения плазмотрона V . Так как имеют место большие градиенты температур по пространственным координатам обрабатываемой детали, теплофизические коэффициенты материала оказываются переменными и в связи с большими сложностями учета подобного рода обстоятельств используются осредненные значения этих параметров, принимаемые по результатам обработки расчетных и экспериментальных данных. В [1] указано, например, что величины упомянутых параметров при обработке стали следует принимать соответствующими температуре $T \approx 900^\circ\text{C}$.

Для определения оптимальных режимов процесса поверхностной плазменной заправки проведено исследование теплового поля в теле ножа размерами 1080×165×45 мм (рисунок 1) из стали 6ХВ2С при различных режимах теплового нагружения. Нож является режущим элементом автоматизированного комплекса для резки листов АКНА-3225.

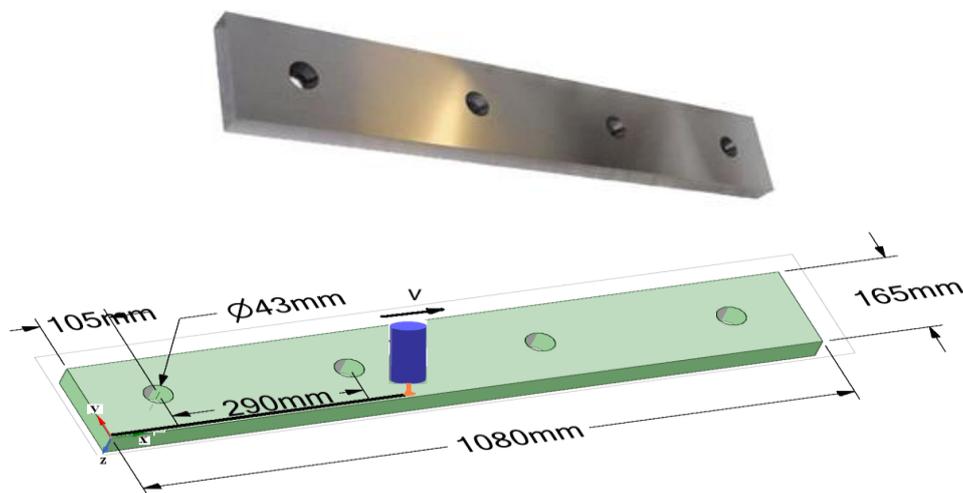


Рисунок 1 – Нож гильотины АКНА-3225

Для описания поля температур в ноже при нагреве его струей плазмы используется линейное уравнение теплопроводности с граничным условием второго рода. Рассматривается задача в пространственной постановке для теплового потока в форме пятна с интенсивностью, распределенной по нормальному закону. Интенсивность потока во времени принимается постоянной.

В определенных случаях, в частности, на начальных фазах нагрева, когда можно принять, что радиус пятна $r_f \ll (at)^{1/2}$ в точках, близких к оси потока, можно использовать одномерные решения, описывающие распределение температуры в зависимости от времени t и глубины z расположения точки под нагружаемой тепловым потоком поверхностью. В этом случае для температуры $T(z,t)$ имеет место зависимость [1]:

$$T(z,t) = 2q_0 \frac{\sqrt{at}}{\lambda} \text{ierfc}\left(\frac{z}{2\sqrt{at}}\right), \quad (1)$$

где $\text{ierfc}(x) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \exp(-x^2) - x \cdot \text{erfc}(x)$ – интеграл от функции интеграла вероятности, $\text{erfc}(x) = 1 - \text{erf}(x)$, $\text{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x \exp(-\xi^2) d\xi$ – функция ошибок [3].

Эффективная толщина зоны теплового влияния составляет примерно $\frac{z}{2\sqrt{at}}$

$\approx 1,6$, где $a = \frac{\lambda}{c\rho}$ – коэффициент температуропроводности, c – удельная теплоемкость. Предельная температура в центре пятна нагрева составит:

$$T(0,0,\infty) = \frac{q_0 r_f}{\lambda}. \quad (2)$$

Для источника с гауссовым распределением $q(r) = q_0 \exp(-kr^2)$ в случае, когда не имеет еще места расплавление материала, температура в центральной точке не превысит значения

$$T(0,0,\infty) = \frac{P_0}{2\lambda} \sqrt{k/\pi} = \frac{q_0}{2\lambda} \sqrt{\pi/k}, \quad (3)$$

где $P_0 = q_0 \frac{\pi}{k}$ – эффективная мощность источника тепла, $k = \frac{1}{(r_f)^2}$ – коэффициент сосредоточенности потока.

Для движущегося с постоянной скоростью V источника тепла температура в центральной точке пятна нагрева в подвижной системе координат определяется по формуле

$$T(0,0,t) = \frac{P_0}{\lambda \pi \sqrt{\frac{\pi}{k}}} \operatorname{arctg} \left(\frac{t}{4ak} \right). \quad (4)$$

При этом в соответствии с (4) температура вначале растет пропорционально корню квадратному по времени, а после некоторого периода времени, зависящего от теплофизических свойств материала, устанавливается квазистационарное состояние, при котором нагретая зона материала перемещается вслед за источником. При этом формула (4) сохраняет свою роль – температура в точках тела не может превысить указанного значения.

Уровень критической интенсивности плотности потока q_0^{nl} , требуемого для достижения на поверхности материала температуры плавления T_{nl} :

$$q_0^{nl} = 1,128 \lambda T_{nl} \sqrt{k}. \quad (5)$$

Уравнение для расчета температуры в точке тела от действия перемещающегося с постоянной скоростью V нормально-кругового источника теплоты в подвижной системе координат имеет вид [1]:

$$T(x, y, z, t) = \left[2P_0 \exp\left(-\frac{Vx}{a}\right) \left(c\gamma(4\pi a)^{3/2}\right) \right] \times \int_0^t \frac{1}{\sqrt{\xi}(t_0 + \xi)} \exp\left[-\frac{z^2}{4a\xi} - \frac{r^2}{4a(t_0 + \xi)} - \frac{V^2(t_0 + \xi)}{4a}\right] d\xi, \quad (6)$$

где $t_0 = \frac{1}{4ak}$ – постоянная времени.

С использованием приведенных выше зависимостей разработана программа на языке FORTRAN, которая позволяет определять температуру в полупространстве (обрабатываемой детали) при воздействии подвижным тепловым потоком налицевую поверхность. В качестве исходных данных задаются ток дуги I , напряжение дуги U , коэффициент полезного действия η плазмотрона, радиус пятна нагрева поверхности r_f , время конца расчета, глубина и радиус проникно-

вения тепла, скорость движения источника нагрева, а также характеристики материала ножа (коэффициент теплопроводности, удельная теплоемкость, плотность, температура плавления). Исходное положение центра пятна нагрева вдоль оси движения Ox задается в точке с координатой $x=r_f$.

В широком диапазоне параметров обработки ($I = 10\text{--}35$ А, $U = 8\text{--}28$ В, $V = 0,1\text{--}20$ см/с, $r_f = 0,05\text{--}0,4$ см) проведен расчет температурных полей в ноже при действии движущегося нормально-кругового источника теплоты (плазменной струи). Расчет проводился в центре пятна нагрева по глубине z , на поверхности вдоль оси y , а также по оси z в плоскостях, параллельных координатной xOz . Типичные зависимости температурного поля от времени при $I = 35$ А,

$U = 25$ В, $\eta = 0,72$, $r_f = 0,1$ см, $T_{nl} = 1550^\circ\text{C}$, $\rho = 7860 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$, $\lambda = 38 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot ^\circ\text{C}}$,

$c = 745 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}$ приведены на рисунках 2–4.

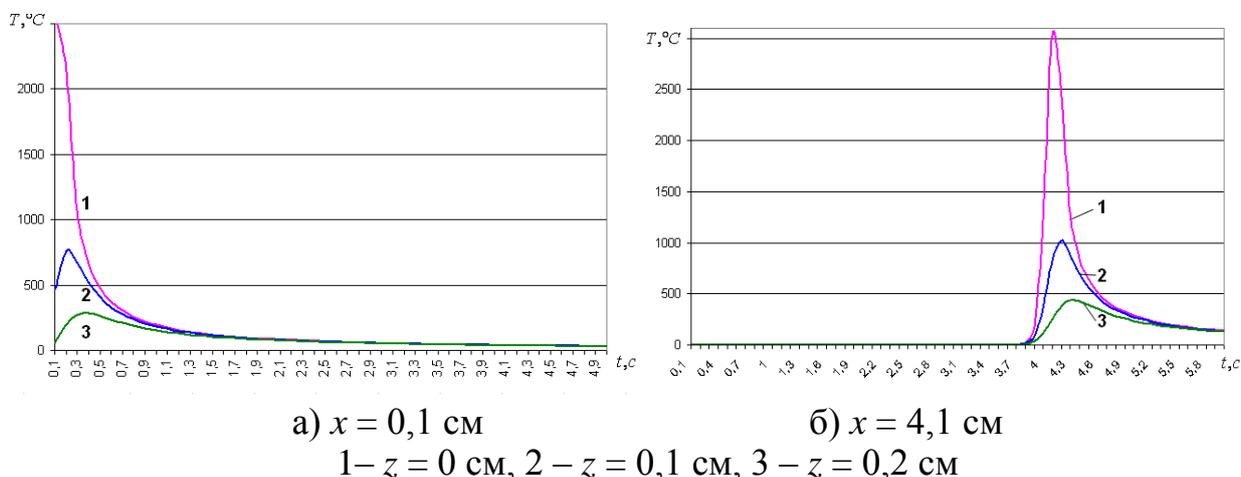


Рисунок 2 – Зависимость температурного поля от времени в плоскости движения оси источника нагрева на различной глубине при $V = 1$ см/с

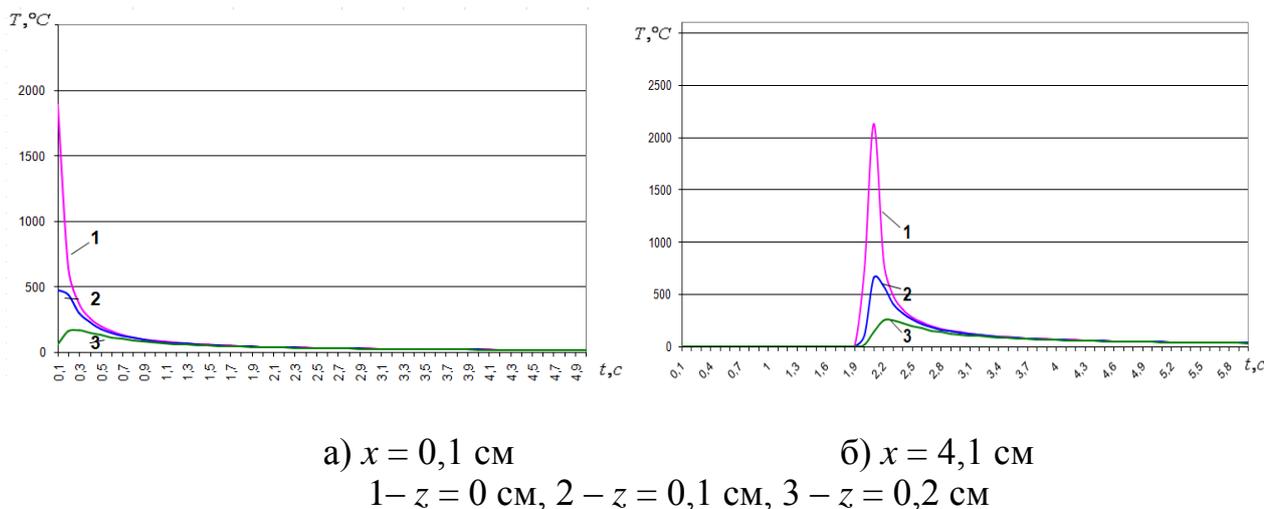
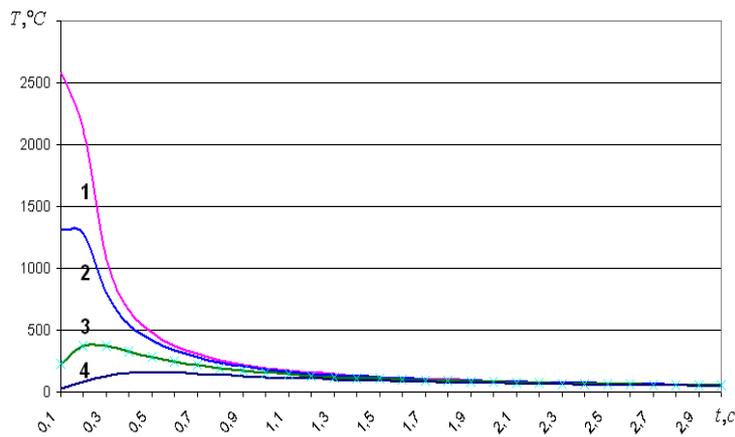
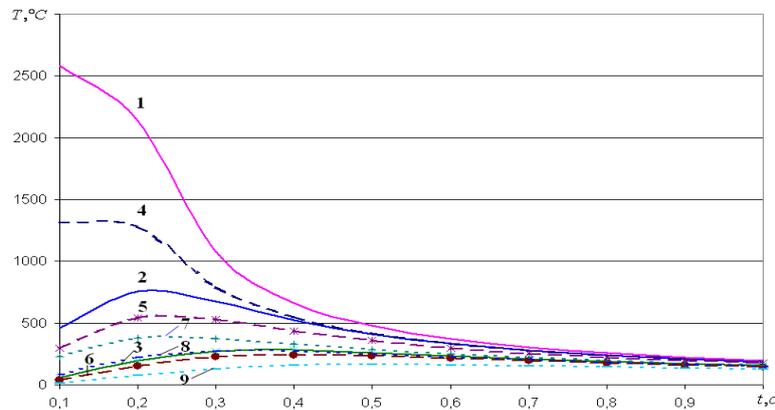


Рисунок 2 – Зависимость температурного поля от времени в плоскости движения оси источника нагрева на различной глубине при $V = 2$ см/с



1 – $y = 0$ см, 2 – $y = 0,1$ см, 3 – $y = 0,2$ см, 4 – $y = 0,3$ см

Рисунок 3 – Зависимость температурного поля от времени на поверхности ножа в направлении оси y на различных расстояниях от траектории движения центра пятна нагрева, $x = 0,1$ см, $V = 1$ см/с



$y = 0$ см: 1 – $z = 0$ см, 2 – $z = 0,1$ см, 3 – $z = 0,2$ см;
 $y = 0,1$ см: 4 – $z = 0$ см, 5 – $z = 0,1$ см, 6 – $z = 0,2$ см;
 $y = 0,2$ см: 7 – $z = 0$ см, 8 – $z = 0,1$ см, 9 – $z = 0,2$ см

Рисунок 4 – Зависимость температуры от времени по оси Oz в плоскостях, параллельных координатной плоскости xOz , $x = 0,1$ см, $V = 1$ см/с

Из рисунка 2 видно, что максимальная температура в точке с координатой $x = 4,1$ см при скорости движения источника нагрева 1 см/с возникает в момент времени $t = 4,3$ с, т. е. точка с максимальной температурой отстает от центра пятна.

С помощью системы компьютерной алгебры MathCAD построены поверхности и линии уровня температуры для различных моментов времени в различных плоскостях. Типичные изотермы для координаты $x = 4,1$ см при $V = 1$ см/с, $r_f = 0,1$ см приведены на рисунке 5.

Результаты исследований показывают, что температуры в точках отрицательной части оси x (позади центра пятна нагрева) выше, чем в точках, расположенных перед плазмотроном, и максимумы температур в них достигаются в разное время.

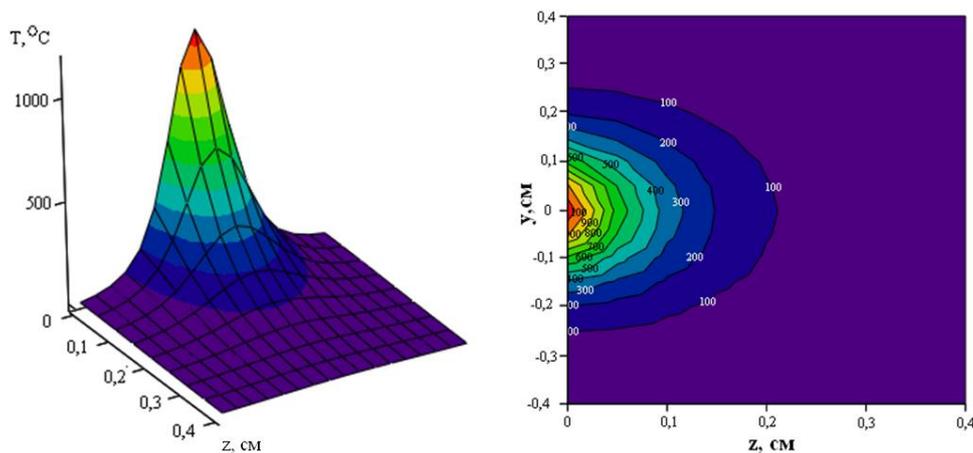


Рисунок 5 – Поверхность температуры и уровни температуры (изотермы) для сечения, перпендикулярного оси Ox , при $t = 4$ с

Основываясь на данных по техническим характеристикам плазмотрона, теплофизическим и механическим свойствам обрабатываемых материалов и их прогнозируемым структурным параметрам после теплового воздействия, с использованием полученных результатов могут быть назначены конкретные режимы термообработки с последующим их уточнением в процессе технологических экспериментов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов: Справочник / Н. Н. Рыкалин [и др.]. – М. : Машиностроение, 1985. – 496 с.
2. Рыкалин, Н. Н. Расчеты тепловых процессов при сварке / Н. Н. Рыкалин. – М.: ГНТИ машиностроительной литературы, 1951. – 296 с.
3. Карлслоу, Г. Теплопроводность твердых тел / Г. Карлслоу, Д. Эгер. – М. : Наука, 1964. – 487 с.

УДК678:661.66:620.1

ПОВЕРХНОСТНЫЕ ЭФФЕКТЫ В ФОТОПОЛИМЕРНЫХ НАНОКОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛАХ

**Овчинников Е. В.¹, Хвисевич В. М.², Эйсымонт Е. И.¹, Веремейчик А. И.²,
Возняковский А. А.³**

1) Гродненский государственный университет им. Янки Купалы,
г. Гродно, Республика Беларусь

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

3) Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе,
г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

Смачивание поверхностей твердых материалов вызывает огромный интерес со стороны фундаментальных и прикладных отраслей научной деятельности. Явление смачивания играет важную роль во многих промышленных процессах,

таких как смазывание, нанесение покрытий из жидкой фазы, закалка твердых материалов распылением жидкой среды и т. д. В данных технологических подходах широко применяются нанокпозиционные полимерные материалы, для которых требуется высокое качество подготовки поверхности для улучшения эксплуатационных свойств, связанных со смачиваемостью: адгезия, антикоррозионная защита, износостойкость, биосовместимость, защита от обрастания и т. д. И наоборот, если несмачивающая жидкость попадает на поверхность уже покрытой смачивающей жидкостью, она будет коагулировать, сводя к минимуму его контактный угол с твердым телом.

Если рассмотреть смачивание водой твердого тела, с большими значениями краевого угла, и смачивание продуктами нефти, в частности масла с малыми краевыми углами при смачивании твердого тела, то в случае комбинированной системы взаимодействия данных материалов, в частности, масло-вода-твердое тело, баланс возникающих сил взаимодействия приведет к значению краевого угла смачивания, отличающегося от исходных значений между жидкостями и поверхностью твердого тела. Баланс сил определяется поверхностным натяжением, контролирующим смачиваемость между твердым телом и жидкостями, а также межфазное натяжение между жидкостями [1].

Шероховатость поверхностных слоев твердого тела играет важную роль в процессах смачивания различными жидкостями, различающимися молекулярной массой и химическим составом. Обычно используемые гидрофобные поверхности обладают высокими значениями краевого угла смачивания. Данный эффект может усиливаться с возрастанием шероховатости твердых поверхностей. В частности, формирование на поверхности твердого тела восковых слоев приводит в существенном увеличению антиадгезионного процесса для полярных растворителей, включая воду [2]. В работе [3] рассмотрены поверхностные свойства наночастиц и их взаимодействие с надмолекулярными и молекулярными структурами полиэтилентерефталата. В частности, формирование полимерных слоев на поверхности наночастиц кремнезема является эффективным методом повышения гидрофобности данных низкоразмерных частиц [4].

Исследование смачиваемости включает измерение краевого угла, который измеряется у капли жидкости. Данная система, связанная с измерением краевого угла смачивания, состоит из трех фаз: твердая, жидкая и газообразная. В качестве базовой модели для расчета удельной поверхностной энергии использовалось уравнение Юнга. Данное выражение связывает краевой угол с тремя действующими межфазными свободными энергиями: твердое тело-пар, жидкость-пар и твердое тело-жидкость. На поверхности твердого тела контактный угол капли жидкости можно описать следующим уравнением Юнга:

$$\sigma_{ТГ} = \sigma_{ТЖ} + \sigma_{ЖГ} \cos \Theta, \quad (1)$$

где $\sigma_{ТГ}$ – поверхностное натяжение на границе раздела твердое тело-газ (ТГ), $\sigma_{ТЖ}$ – поверхностное натяжение на границе раздела твердое тело-жидкость (ТЖ), $\sigma_{ЖГ}$ – поверхностное натяжение на границе раздела жидкость-газ.

Для гладких поверхностей краевой угол Θ лежит в диапазоне $0 < \Theta < 90^\circ$ и обладает хорошей смачивающей способностью, жидкость будет растекаться по большой площади поверхности. Контактный угол воды зависит от шероховатости поверхности и объясняется двумя моделями, известными как модель Венцеля и модель Кассье. Венцель ввел модель, описывающую смачивание шероховатых поверхностей, в то время как Кассье показал взаимосвязь смачивания

поверхности с химической неоднородностью. Согласно Венцелю, жидкость удерживает тесный контакт с микроструктурой поверхности и полностью смачивается жидкостью. Полное смачивание шероховатой поверхности записывается как

$$\cos\Theta_w = r \cos\Theta, \quad (2)$$

где Θ_w – краевой угол смачивания Венцеля на шероховатой поверхности, r – коэффициент шероховатости поверхности, Θ – краевой угол смачивания Юнга на гладкой поверхности того же материала.

В уравнении (2) значения r всегда больше единицы. Следовательно, увеличение параметров шероховатости поверхности фактически всегда увеличивает смачиваемость твердой поверхности. Кассье предложил уравнение для гидрофобной поверхности с большими значениями шероховатости. С увеличением шероховатости поверхности воздух проникает в гидрофобную границу твердой и жидкой фаз. Предполагается, что граница раздела состоит из твердого тела и воздуха. Частичное смачивание шероховатой поверхности можно оценить по уравнению Кассье:

$$\cos\Theta_c = \gamma_1(\cos\Theta_1) + \gamma_2(\cos\Theta_2), \quad (3)$$

где Θ_1 – угол контакта компонента 1, присутствующего в композиционном материале, с долей площади поверхности γ_1 ; Θ_2 – угол контакта компонента 2 с долей площади поверхности γ_2 .

Обе модели объясняют, как шероховатость поверхности влияет на значения краевого угла смачивания. Водоотталкивающая способность различных материалов оказала большое влияние на развитие ряда технических областей применения жидкостей, в частности текстильная промышленность, строительство, т. к. необходимо было решать такие задачи, как самоочистка материалов и сооружений, защита от старения, разделение масляно-водных эмульсий и т. п.

Объектом исследований являлись полимерные композиционные материалы, модифицированные графеновыми наноструктурами. Углеродные и графеновые частицы были получены из различного органического сырья (лигнин, целлюлоза, крахмал и др.) методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС).

Для изготовления образцов композиционных материалов использовали фотополимерную смолу марки Nova3D. Для модифицирования фотополимерной матрицы применяли мультилисты графена (ТУ 23.99.14.130-006-16720618-2018). Концентрация модификатора составляла от 0,1 % мас. до 2 % мас. Образцы для исследований формировали на оборудовании для аддитивного получения полимерных изделий из фотополимерных смол марки SparkMaker (3D-принтер). Дополнительно полученные образцы обрабатывались УФ-излучением в течение 300 с.

Также для изготовления образцов композиционных материалов использовали фотополимерную смолу марки Anycubic 450 nm. Для модифицирования фотополимерной матрицы применяли графеновый модификатор, полученный из шихты «70 % мас. глюкоза – 30 % мас. нитрат аммония» и шихты «70 % мас. целлюлоза – 30 % мас. нитрат аммония». Концентрация модификатора составляла от 0,0025 % мас. до 4 % мас. Данные образцы также получали методом 3D-печати.

Оценку удельной поверхностной энергии полимерных композиционных материалов на базе фотополимерных смол, модифицированных графеновыми

наноструктурами, проводили по величине краевого угла смачивания (метод «неподвижной капли»). В соответствии с методикой исследования определяли значения краевого угла смачивания как минимум двух жидкостей с известными значениями параметра γ на твердой поверхности. Значения параметра γ твердого тела оцениваются на основе теоретические моделей Юнга, Оунса-Вендта, Неймана или Ву. В качестве жидкостей, применяемых для исследований, использовали дистиллированную воду и вазелиновое масло.

Результаты исследований удельной поверхностной энергии образцов на базе фотополимерной смолы в зависимости от концентрации нанодисперсных графеновых частиц, получаемых СВС-синтезом, представлены в таблицах 1–3.

Установлено, что введение нанодисперсных углеродных частиц в высокомолекулярную матрицу на основе фотополимера приводит к существенному изменению значений удельной поверхностной энергии. Зависимость значений удельной поверхностной энергии композиционных материалов от концентрации модификатора имеет не линейный, а параболический характер. На вид зависимости существенное влияние оказывает структура и предыстория углеродного модификатора.

Таблица 1 – Значения удельной поверхностной энергии образцов из фотополимерной смолы Anusubic, модифицированной ГПС, полученными из шихты «70 % мас. глюкоза – 30 % мас. нитрат аммония»

Параметр	Значения при концентрации модификатора, % мас.				
	0	0,025	1,0	2,0	4,0
Угол смачивания вазелинового масла, град	26,53	64,43	51,50	60,45	22,81
Угол смачивания водой, град	64,43	62,57	57,02	67,78	65,35
Работа адгезии вазелинового масла, мДж	56,84	42,95	48,68	44,80	57,65
Работа адгезии воды, мДж	103,02	105,11	111,13	99,17	101,97
Дисперсионный компонент поверхностной энергии, мДж/м ²	10,15	36,21	33,20	23,93	8,40
Полярный компонент поверхностной энергии, мДж/м ²	86,43	127,59	133,40	102,89	81,64
Поверхностная энергия, мДж/м ²	96,58	163,80	166,59	126,82	90,03

Таблица 2 – Значения удельной поверхностной энергии образцов из фотополимерной смолы Anusubic, модифицированной ГПС, полученными из шихты «70 % мас. целлюлоза – 30 % мас. нитрат аммония»

Параметр	Значения при концентрации модификатора, % мас.				
	0,0025	0,0375	0,05	0,1	0,2
Угол смачивания вазелинового масла, град	32,91	39,43	47,23	26,99	39,47
Угол смачивания водой, град	65,82	69,91	79,98	70,43	41,83
Работа адгезии вазелинового масла, мДж	55,19	53,17	50,37	56,73	53,16
Работа адгезии воды, мДж	101,44	96,68	84,48	96,06	125,58
Дисперсионный компонент поверхностной энергии, мДж/м ²	10,76	9,13	3,69	5,22	46,92
Полярный компонент поверхностной энергии, мДж/м ²	85,53	76,48	51,43	67,58	176,18
Поверхностная энергия, мДж/м ²	96,29	85,60	55,12	72,80	223,11

Таблица 3 – Значения удельной поверхностной энергии фотополимера Nova3D, модифицированного ГПС

Параметр	Значения при концентрации модификатора, % мас.			
	0	0,1	0,6	2,0
Угол смачивания вазелинового масла, град	37,52	26,90	16,10	23,95
Угол смачивания водой, град	85,61	77,74	81,23	70,22
Работа адгезии вазелинового масла, мДж	53,79	56,75	58,82	57,42
Работа адгезии воды, мДж	77,47	87,24	82,93	96,31
Дисперсионный компонент поверхностной энергии, мДж/м ²	0,13	1,24	0,03	4,80
Полярный компонент поверхностной энергии, мДж/м ²	32,05	46,73	34,96	66,87
Поверхностная энергия, мДж/м ²	32,19	47,97	34,98	71,67

Исследования проведены в рамках выполнения проекта БРФФИ № T21PM-169.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Fundamentals of wettability / W. Abdallah [et al.] // Oilfield Review. – (2007). – 19 (2). – 44–61.
2. Puliyalil H. Recent advances in the methods for designing superhydrophobic Surfaces / H. Puliyalil, G. Filipic, U. Cvelbar // Surfaces Energy / Edited by M/ Aliotkhazraei. – 2015. – December 16th. – P. 311–335.
3. Dispersibility of hydrophilic and hydrophobic nanosilica particles in polyethylene terephthalate films: evaluation of morphology and thermal properties / M. Parvinzadeh Gashti [et al.] // Polymers and Polymer Composites. – 2015. – Vol. 23 (5). – P. 285–295.
4. Zou H. Polimer / silica nanocomposites: preparation, characterization, properties, and applications / Hua Zou, Wu Shishan, Jian Shen // Chemical reviews (American chemical society). – 2008. – Vol. 108 iss: 9. P. 3893–3957.

УДК 621.794.6

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ

*Овчинников Е. В.¹, Хвисевич В. М.², Эйсымонт Е. И.¹, Веремейчик А. И.²,
Исраа Акрам¹*

*1) Гродненский государственный университет им. Янки Купалы,
г. Гродно, Республика Беларусь*

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

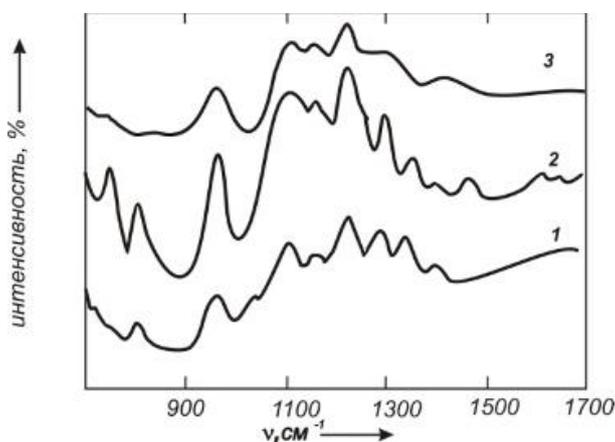
Тонкопленочные ингибиторы изнашивания трибосистем, сформированные из активной газовой фазы, растворов, ротапринтными и плазмохимическими методами, широко применяют в триботехнике, в т. ч. прецизионной [1–4].

Несмотря на различие технологий формирования фторсодержащих покрытий (ФСП), отличающихся составом, структурой и геометрическими параметрами, существуют общие закономерности проявления механизма их антифрикционного и противоизносного действия, обусловленные спецификой молекулярного и надмолекулярного строения. Низкий уровень межмолекулярного взаимодействия во фторсодержащих полимерных и олигомерных компонентах способствует низким значениям тангенциального сдвига поверхностных слоев в изделиях из композиционных материалов или в покрытиях на поверхностях фрикционного контакта. Одновременно эта характерная особенность строения фторсодержащих соединений обуславливает повышенный износ изделий из-за низкой способности продуктов фрикционного диспергирования к адгезионному закреплению на поверхностях трения и формированию устойчивой разделительной пленки [1–4].

Для повышения параметров триботехнических характеристик фторсодержащие полимерные и олигомерные матрицы модифицируют компонентами различного состава, дисперсности, строения и механизма действия, а также подвергают энергетическим воздействиям с помощью лазерных, ионизирующих, тепловых и др. источников. Различные методы модифицирования позволяют управлять параметрами структурных характеристик, которые определяют параметры деформационно-прочностных, триботехнических, адгезионных, теплофизических и др. служебных характеристик композитов.

Представляет научный и практический интерес установление характерных механизмов модифицирующего действия различных функциональных компонентов в композиционных покрытиях на основе фторсодержащих олигомеров, нашедших широкое распространение в практике эксплуатации трибосистем автотракторной, железнодорожной и специальной техники.

Исследование структуры слоев фтороксов, адсорбированных на подложке из электролитического хрома, модифицированного ультрадисперсными кластерами синтетического углерода, проводили с использованием метода инфракрасной спектроскопии многократно нарушенного полного внутреннего отражения (ИКС МНПВО). Спектры исходных фтороксов представлены на рисунках 1–4. В таблице 1 приведены основные полосы поглощения, наблюдающиеся в спектрах Ф1, Ф14 и ФА.

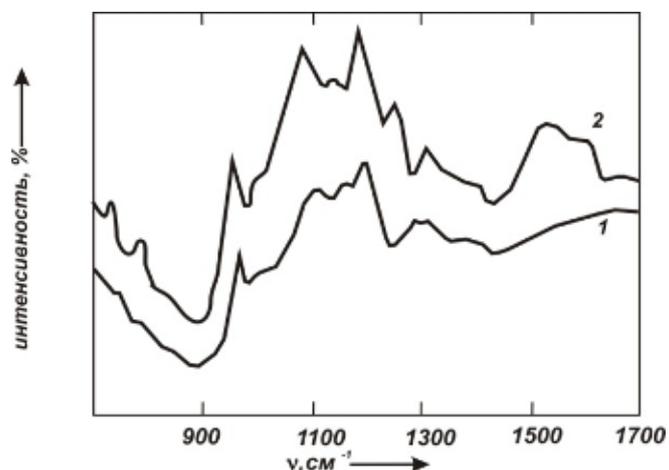


1 – Ф-А (1 обр.); 2 – Ф-1 (1 обр.); 3 – Ф-14 (1 обр.)

Рисунок 1 – ИК-спектры поглощения фторсодержащих олигомеров, нанесенных на подложку из электролитического хрома, модифицированную ультрадисперсными кластерами алмаза

Таблица 1 – Основные полосы поглощения фторсодержащих олигомеров на подложке из электролитического хрома, модифицированного ультрадисперсными кластерами синтетического углерода

Максимумы полос поглощения в спектрах фторсодержащих олигомеров различных марок, см ⁻¹		
Ф-1	Ф-14	Ф-А
980	–	980
1000	1000	1000
1050	–	1050
1	2	3
1120	–	1120
–	1130	–
–	1150	–
1180	–	1180
–	1210	–
1230	–	1230
–	1245	–
1300	–	–
–	–	1305
–	1340	–
1360	–	1360
–	1370	–
1450	–	1450
–	–	1590
1640	–	–
1680	–	1680
1730	–	–
–	–	1740



1 – Ф-14 (3 обр.); 2 – Ф-А (3 обр.)

Рисунок 2 – ИК-спектры поглощения фторсодержащих олигомеров, нанесенных на подложку из электролитического хрома, модифицированного ультрадисперсными кластерами алмаза

Основные полосы поглощения фторсодержащих олигомеров (ФСО) Ф1, Ф14 и ФА находятся в области волновых чисел от 700–1700 см⁻¹. Полоса поглощения при 900 см⁻¹ может быть отнесена к поглощению CF₃- групп макромолекул

ФСО. Полосы поглощения в области $1130-1340\text{ см}^{-1}$ принадлежат колебаниям связей С–F и С–F. В отличие от ФА и Ф1, в спектре Ф14 на подложке из электролитического хрома, модифицированного ультрадисперсными кластерами синтетического углерода, наблюдается дополнительная полоса в области 1340 см^{-1} . Согласно литературным данным, эта полоса поглощения не наблюдается при нанесении Ф14 на подложки из меди, алюминия, железа.

Для фолеокса ФА, нанесенного на хромалмазную подложку, в области $1580-1660\text{ см}^{-1}$ наблюдается интенсивная, размытая полоса поглощения, которую можно отнести к поглощению аминных групп NH_2 ; N. Интенсивная полоса 1680 см^{-1} , которая наблюдается при нанесении Ф1 на медную, железную подложки и авторами идентифицируется как полоса поглощения, принадлежащая солям металла – $(\text{COO})_2\text{Me}$, фактически не проявляется. Слабая полоса поглощения при 780 см^{-1} отнесена к поглощению групп CF_3 в аморфных областях. Увеличение толщины покрытия ФСО приводит к повышению контрастности спектров МНПВО ФСО.

При этом следует отметить неоднозначность изменения оптических плотностей полос поглощения с увеличением толщины слоя ФСО (таблица 2), что свидетельствует об оптической неоднородности слоев ФСО разной толщины и может быть объяснено ориентационной неоднородностью фолеоксов в зависимости от толщины слоя.

Поляризационные исследования показывают, что с увеличением толщины слоя ФСО на подложке из модифицированного хрома вектор момента колебательного перехода связей CF изменяет преимущественную ориентацию с параллельной относительно подложки на перпендикулярную. Следовательно, укладка макромолекул в тонких слоях до $0,1\text{ мкм}$ осуществляется перпендикулярно подложке.

Дихроизм полос поглощения групп CF, CF_2 – в спектрах фолеоксов на щелочно-галлоидных подложках близок к единице, следовательно, ориентация ФСО на хромалмазной подложке вызвана влиянием последней. Расчет дихроизма полос поглощения в зависимости от количества слоев N показывает (таблица 2), что характер функции $R(N)$ немонотонный (рисунок 3). Наблюдаются ярко выраженные точки экстремума. Причем на вид экстремума существенное влияние оказывает марка фолеокса, т. е. строение молекулы олигомера.

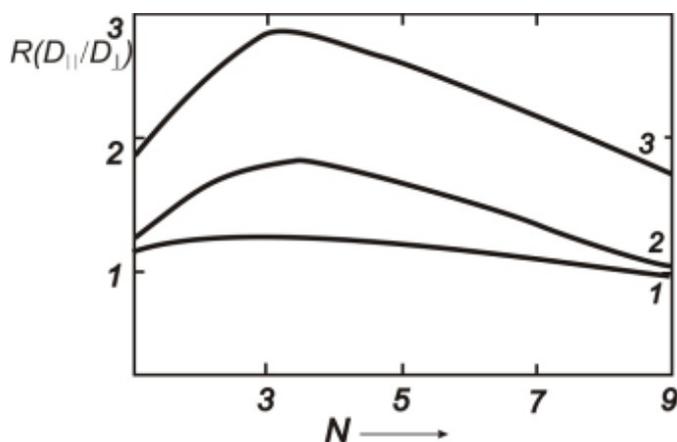


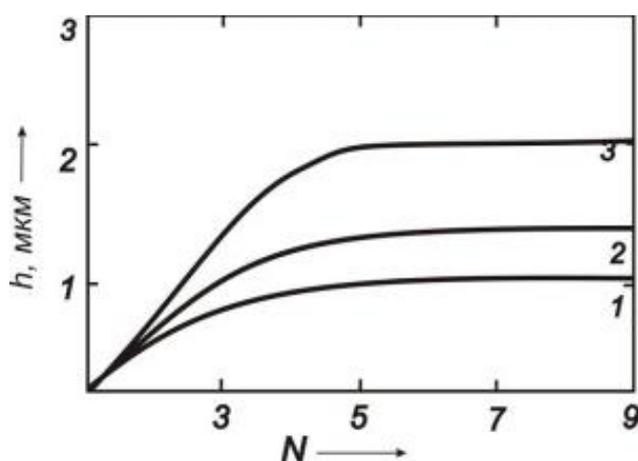
Рисунок 3 – Зависимость дихроизма полосы поглощения 1120 см^{-1} от количества обработок фторсодержащим олигомером подложки из электролитического хрома, модифицированного ультрадисперсными кластерами синтетического углерода

Таблица 2 – Зависимость дихроизма полос поглощения фторсодержащих олигомеров на хромалмазных подложках от количества слоев покрытия

Частота, ν , см^{-1}	1 слой		3 слоя	
	Оптическая плотность, D	Дихроизм, R	Оптическая плотность, D	Дихроизм, R
980	0,552	0,643	0,211	1,303
1000	0,840	1,039	0,486	0,641
1040	–	–	0,160	2,417
1050	0,590	1,243	–	–
1120	0,179	1,467	–	–
1125	–	–	0,405	1,578
1180	0,132	1,582	0,316	1,895
1230	0,198	1,301	0,447	1,469
1305	0,111	2,000	0,236	2,233
1360	0,100	0,965	0,136	1,467
1450	0,030	0,667	0,044	1,235
1590	1,073	0,965	0,535	1,126
1680	1,021	0,091	0,725	1,547
1725	–	–	1,519	1,141
1740	1,093	0,757	–	–

Исследования по определению толщины фолеокса ФА показали, что толщина покрытия растет до значений 1 мкм (рисунок 4), соответствующей третьей обработке.

Дальнейшее нанесение пленки фолеокса из раствора не ведет к значительному росту толщины покрытия, т.е. увеличение количества обработок после достижения максимальной толщины покрытия фторсодержащих олигомеров приводит к образованию более деформированной поверхности, которая и обуславливает уменьшение значений R. Такое поведение на хромалмазной подложке характерно для всех исследуемых фолеоксов.



1 – ФА; 2 – Ф1; 3 – Ф14

Рисунок 4 – Зависимость толщины покрытия фторсодержащего олигомера h на подложке из электролитического хрома, модифицированного ультрадисперсными кластерами синтетического углерода, от количества обработок

Необходимо отметить, что наиболее толстые покрытия на хромалмазных подложках формирует флорекс Ф14, толщина которых после десяти обработок достигает до 2,2 мкм, в то время как полярные флорексы Ф14 и ФА формируют покрытия до 1 мкм.

По-видимому, полярные группы, осаждаются на активных центрах хромалмазных покрытий, уменьшают действие силового поля поверхности, в результате чего снижается толщина формируемого покрытия.

Обычно нанесение фторсодержащих олигомеров на металлические подложки приводит к ориентационным эффектам. Одним из механизмов, объясняющих эффект ориентации ФСО на поверхности металла, является то, что в процессе механической обработки свойства и структура поверхностных слоев коренным образом изменяются. Характер этих изменений, как ранее отмечалось, распространяется нередко на значительную глубину (до нескольких микрон) и зависит от исходных свойств металла, метода механической обработки и режима.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Овчинников, Е. В. Тонкие пленки фторсодержащих олигомеров: основы синтеза, свойства и применение / Е. В. Овчинников, В. А. Струк, В. А. Губанов. – Гродно : ГГАУ, 2007. – 326 с.

2. Рогачев, А. В. Тонкие вакуумные полимерные покрытия: обзор информ. / А. В. Рогачев, О. И. Палий, П. Д. Петрашенко. – Гомель. Гомельский политех. ин-т. 1988. – 43 с.

3. Наноконпозиционные электролитические покрытия / С.Д. Лещик [и др.] // Инженерия поверхности. Новые порошковые композиционные материалы. Сварка: В 2 ч. Матер. междунар. симп., провод в рамках 13-й междунар. выставки «Порошковая металлургия – 2011», 9-й междунар. выставки «Сварка и резка – 2011», междунар. спец. салона «Защита от коррозии. Покрытия – 2011», Минск, 23-25 марта 2011 / Институт порошковой металлургии ГНО ПМ НАН Беларуси, 2011. – Ч. 2. – С. 58–62.

4. Заявка а 20130106, Республика Беларусь, МПК С 25D 15/00 (2006.01), С 23F 11/08 (2006.01). Способ получения композиционного покрытия на основе электролитического хрома / В. А. Струк [и др.]; заявитель Учреждение образования «Гродненский государственный университет имени Янки Купалы» – № а 20000463; заявл. 28.01.2013; опубл. 30.08.2014. Бюл. № 4. – 1 с.

УДК 669.539.620+534.29

ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ НА ПРОЦЕСС РКУП И СВОЙСТВА ПОЛУЧАЕМЫХ ОБРАЗЦОВ

*Рубаник В. В., Рубаник В. В. мл., Ломач М. С., Дородейко В. Г., Луцко В. Ф.
Институт технической акустики НАН Беларуси,
г. Витебск, Республика Беларусь*

Разработка методов объемного наноструктурирования металлических материалов является актуальным направлением современного материаловедения. При этом особенности наноструктурированных материалов определяются ме-

202

тодами получения и оказывают существенное влияние на их свойства. В настоящее время наиболее распространены и изучены два метода интенсивной пластической деформации (ИПД): равноканальное угловое прессование (РКУП) и кручение под высоким давлением (КВД). РКУП как способ ИПД металлических материалов, позволяющий получать заготовки с ультрамелкозернистой структурой (УМЗ) за счет объемного наноструктурирования, был предложен В. М. Сегалом с сотрудниками в 70-х годах [1]. В начале 90-х годов Р. З. Валиевым с соавторами метод был развит и впервые применен как метод ИПД для получения структур с субмикроструктурными и нанометрическими размерами [2]. Этот метод использовали для получения субмикроструктурной структуры таких металлов, как Cu, Pd, Fe, Ni, Co, сплавов на основе алюминия, магния, титана, цинка и др. КВД впервые было применено для обработки металлических материалов П. Бриджменом в 1935 году [3]. Свое второе рождение метод получил благодаря работам российских ученых в 70–90-е годы прошлого столетия, в которых он был использован для получения наноструктурированных состояний многих чистых металлов, интерметаллидов, сплавов и керамик.

Преимуществом процесса РКУП является то, что при его реализации заготовка может подвергаться сколь угодно большим деформациям сдвига, практически не изменяя при этом своих размеров. Повторными проходами образца через пересекающиеся каналы можно добиться накопления желаемой степени деформации и, соответственно, структурных изменений, при этом форма образца сохранится, за исключением некоторой области вблизи его концов. Однако при повторяющихся проходах образца через каналы, трение между заготовкой и матрицей может сильно повлиять на деформационные усилия, течение металлов и свойства материала [4]. Для снижения деформационных усилий разрабатываются различные устройства и приемы, в том числе и ультразвуковые [5–7].

Известно, что ультразвуковая обработка является одним из высокоэффективных методов не только влияния на силовые условия деформирования, но и на изменения микроструктуры и физико-механических свойств материалов [5]. 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 [6], где ультразвуковые колебания (УЗК), снижая силы трения, влияют как на протекание процесса прессования, так и на свойства получаемых заготовок.

Равноканальное угловое прессование алюминия с наложением на пуансон УЗК было исследовано Ф. Джаванрооди с соавторами [7]. Результаты их исследования подтвердили, что использование ультразвуковых колебаний снижает нагрузку прессования, но всего лишь на 10 %. При этом значительное влияние оказывает на снижение усилия прессования, амплитуда и частота колебаний.

Также при использовании УЗК при РКУП приводит к увеличению предела текучести, предела прочности и твердости металлических материалов. Ультразвуковая колебательная система, разработанная Ф. Джаванрооди, состояла из трех основных частей: ультразвуковой генератор (источник питания), ультразвуковой пьезоэлектрический преобразователь и волновод, который служил пуансоном. Недостатком предложенного способа [7] ультразвукового воздействия на РКУП является низкая эффективность, так как снижение усилия прессования составляет менее 10 %. Это связано с невозможностью ввода в очаг деформации значительной ультразвуковой энергии.

В ИТА НАН Беларуси было разработано устройство для РКУП, позволяющее возбуждать ультразвуковые колебания непосредственно в матрице. В качестве исследуемого материала был выбран цинк. Источником ультразвука служил ультразвуковой генератор УЗГ2-4М мощностью 4,5 кВт с магнитострикционным преобразователем ПМС-15А-18. Частота колебаний составляла 18 кГц, амплитуда колебаний ~ 30 мкм. Процесс РКУП осуществляли на гидравлическом прессе, усилием 4 тонны со скоростью перемещения пуансона ~ 1-10 мм/с. Прессование осуществляли при комнатной температуре ~25 °С через матрицу с углами пересечения каналов 90°. Зеренную структуру исследовали с помощью растрового электронного микроскопа марки LEO1455VP (Carl Zeiss, Германия) с дифракционной приставкой фазового анализа HKL EBSD Premium System Channel5 (система дифракции отраженных электронов) (Великобритания). Полученные растровые электронно-микроскопические изображения были адаптированы к программной среде NEXSYS ImageExpert Pro 3, предназначенной для обработки изображений, полученных методом растровой-электронной микроскопии. Микротвердость образцов определяли при помощи микротвердомера AFFRI-MVDM8 с нагрузкой 0,0294 Н и выдержкой под нагрузкой в течение 3 секунд.

Установлено, что наложение УЗК в процессе РКУП цинка приводит к снижению усилия прессования в 1,5–2 раза, что подтверждается и теоретическими расчетами (рисунок 1). Существенно отличается и микротвердость образцов (рисунок 2).

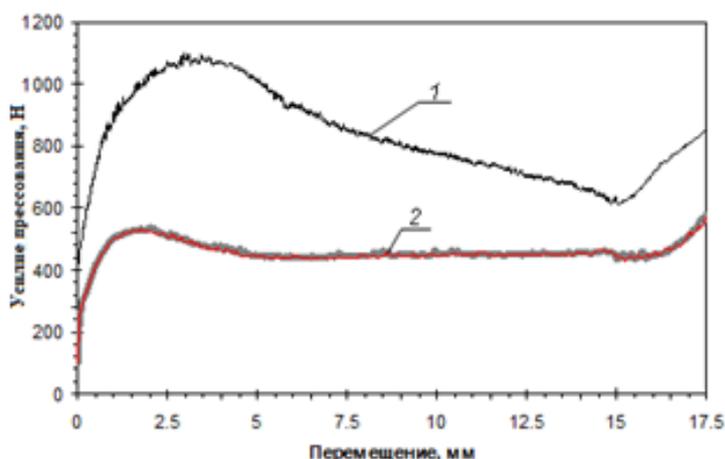


Рисунок 1 – Зависимость расчетного усилия прессования для обычного (1) и ультразвукового РКУП (2) от перемещения пуансона

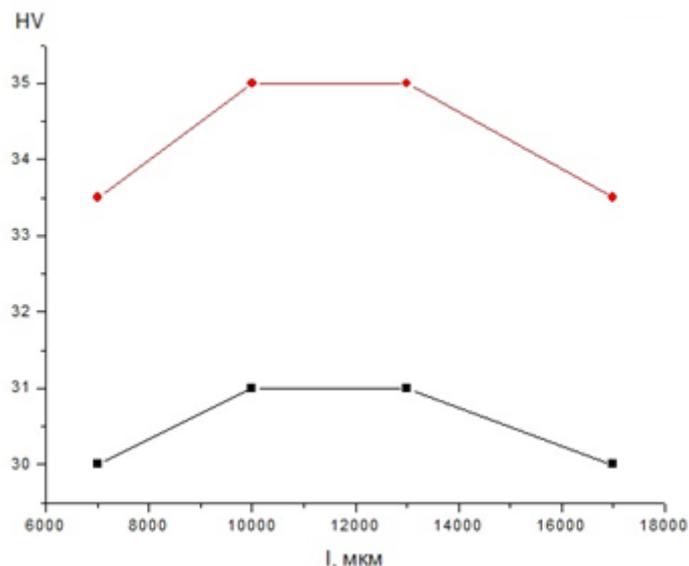
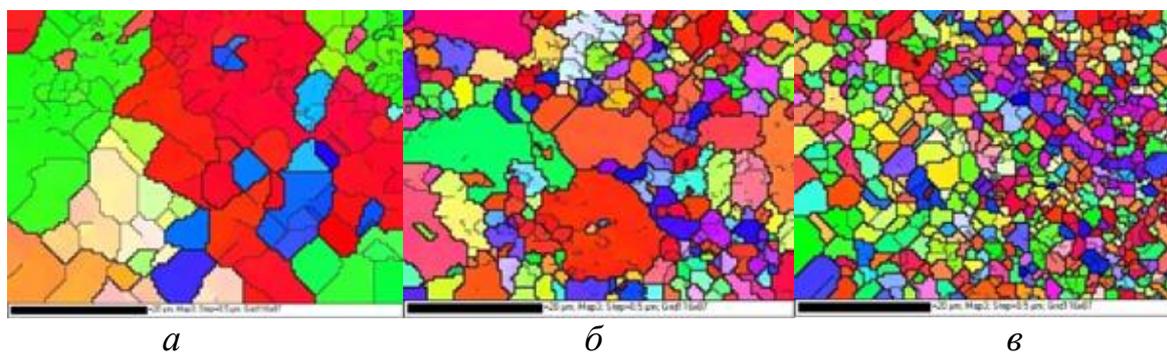


Рисунок 2 – Микротвердость цинка после одного прохода РКУП

При этом, даже после одного прохода микроструктура материала, полученная прессованием с наложением УЗК, существенно отличается от микроструктуры образцов, полученных без УЗК (рисунок 2). Как видно, (рисунок 3) также наблюдается уменьшение размера зерен и изменение их кристаллографической ориентировки.



*а – исходный; б – после 1 прохода без УЗК;
в – после 1 прохода с УЗК*

Рисунок 3 – Зеренная структура цинка

На основании проведенного аналитического обзора влияния ультразвуковых колебаний на пластическую деформацию металлов установлено, что ультразвуковое воздействие является одним из высокоэффективных методов изменения микроструктуры и физико-механических свойств объемных материалов. Разработан способ равноканального углового прессования с подводом ультразвуковых колебаний непосредственно к матрице.

Проведенные исследования влияния ультразвукового воздействия на процесс РКУП показали, что ультразвуковые колебания снижают усилия прессования в 1,5 и более раза за счет уменьшения силы трения между взаимодействующими поверхностями: заготовка–матрица. Выявлено, что ультразвуковое воздействие на процесс РКУП, является эффективным способом воздействия на

структуру цинка с целью улучшения его свойств. Так при РКУП с УЗК наблюдается повышение механических свойств цинка при сохранении высоких пластических свойств. Использование ультразвуковых колебаний в процессе РКУП изменяет саму кинетику процесса, так и свойства металла при формировании в нем ультрамелкозернистой структуры, что позволяет реализовать сочетание прочности и пластичности.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Valiev, R. Nanostructuring of Metals by Severe Plastic Deformation for Advanced Properties / R. Valiev. *Nature Materials*. – 2004. – Vol. 3. – P. 511–516.
2. Формирование субмикрoзернистой структуры в меди и никеле с использованием интенсивного сдвигового деформирования / Н. А. Ахмадеев. [и др.] // *Металлы*. – 1992. – Т. 5. – С. 96–101.
3. Effects of High Shearing stress combined with High Hydrostatic Pressure / P. W. Bridgman // *Physical Review*. – 1935. – Vol. – 48. – P.–825.
4. Валиев, Р. З. Объёмные наноструктурные металлические материалы: получение, структура и свойства / Р. З. Валиев, И. В. Александров. – М. : Академкн., 2007. – 397 с.
5. Клубович, В. В. Ультразвук и пластичность / В. В. Клубович, А. В. Степаненко. – Минск: Наука и техника, 1976. – 446 с.
6. 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.
7. Djavanroodi, F. Experimental investigation of ultrasonic assisted equal channel angular pressing process/ F. Djavanroodi, H. Ahmadian, R. Naseri, K. Koohkan, M. Ebrahimi // *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. – May 2016. – Volume 16. – Issue 3. – P. 249–255.

УДК 631.31

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛА ЛЕМЕХОВ ПЛУГА ПОЧВООБРАБАТЫВАЮЩИХ МАШИН

*Хвисевич В. М.¹, Парфиевич А. Н.¹, Веремейчик А. И.¹, Савчук С. В.¹,
Башуцкая С. М.²*

1) Брестский государственный технический университет,

г. Брест, Республика Беларусь

2) ОАО «Брестгазоаппарат»,

г. Брест, Республика Беларусь

Введение

В сельскохозяйственном производстве Республики Беларусь ежегодно возделывается около 9 млн га посевных площадей. Для выполнения технологического процесса необходимо производить различные виды механической обработки почвы: вспашку, глубокое рыхление, культивацию, фрезерование, боро-

нование и др., основной из которых, как известно, является вспашка. В общих затратах энергии при возделывании сельскохозяйственных культур доля вспашки составляет более 35 % [1]. При проведении таких технологических операций в сельскохозяйственном производстве широко используются представляющие собой плоские элементы в виде рабочих органов почвообрабатывающих машин (лемеха плугов, полевые доски, отвалы корпусов плугов). Эти детали работают в условиях повышенного абразивного изнашивания и значительных статических и динамических нагрузок. Ресурс работы таких рабочих органов плугов, как лемеха, в значительной степени определяет производительность и агротехнические сроки производства работ. В результате эти детали должны обладать высокой прочностью и износостойкостью, так как при непрерывном контакте с почвой происходит затупление режущей части лемеха и изменение его формы, уменьшение размеров и потеря массы.

В процессе эксплуатации лемехов «VULCAN» (производитель Chapmans Ltd (Великобритания)) и «BELLOTA» (BELLOTA AGRISOLUTIONS, S.L.U, Испания) в ОАО «Остромечеве» установлено, что срок их эксплуатации ограничен 10–12 га вспашки, что свидетельствует о незначительном объеме производства работ.

Исследования проведены с целью повышения ресурса работы лемехов для наиболее часто используемых на сельскохозяйственных предприятиях двух видов лемехов «VULCAN» и «BELLOTA».

а)



б)



а – состояние при поставке; б – изношенное состояние
Рисунок 1 – Общий вид лемеха «VULCAN»



Рисунок 2 – Общий вид лемеха «BELLOTA»

Основная часть

Из литературных источников [1–4] известно, что для увеличения срока службы лемехов существуют различные способы, например, такие как наплавка, механическая обработка, выполнение технологических отверстий, различные виды термообработки, которые часто используются для решения этой проблемы. С целью установления вида термообработки проведено исследование химического состава и микротвердости сталей, из которых изготовлены лемеха. Исследования проводились совместно с аккредитованным испытательным центром бытовой техники белорусско-российского СП ОАО «Брестгазоаппарат».

1. Анализ лемеха «VULCAN»

Результаты исследований микроструктуры и микротвердости показали:

- что твёрдость поверхностного обезуглероженного слоя по толщине составляет $(139 \div 183) \text{HV}_{0,1}$;
- твёрдость центральной части по толщине: до $474 \text{HV}_{0,1} \sim 46 \text{HRC}$;
- глубина обезуглероженного слоя $(70,8 \dots 587) \text{ мкм}$.

Многоструктурным анализом (травление 4 % HNO_3) на поверхности обнаружен обезуглероженный слой и строчечная структура: полосы феррита (Φ) чередуются с полосами перлита (Π) (рисунок 3). Обезуглероживание поверхности и строчечность являются крупнейшим пороком микроструктуры.

Также в поверхностном слое и на поверхности обнаружены неметаллические включения (неМе).

Особенно вредна строчечность связанная с неМе включениями. неМе включения опасны тем, что около них происходит концентрация напряжений и начинается разрушение материала.

Выписанные в протоколе результаты анализа содержания C и S получены на анализаторе углерода и при смещении стружки (стружка была насверлена с центральной части по толщине) – объемный анализ.

Дополнительно на эмиссионном спектрометре ARL – 3460 было проверено содержание C и S на поверхности лемеха. Оно составило 0,15 % C , что подтверждает наличие обезуглероженности на поверхности.

Быстрый износ лемеха происходит из-за брака материала – мягкий обезуглероженный слой.

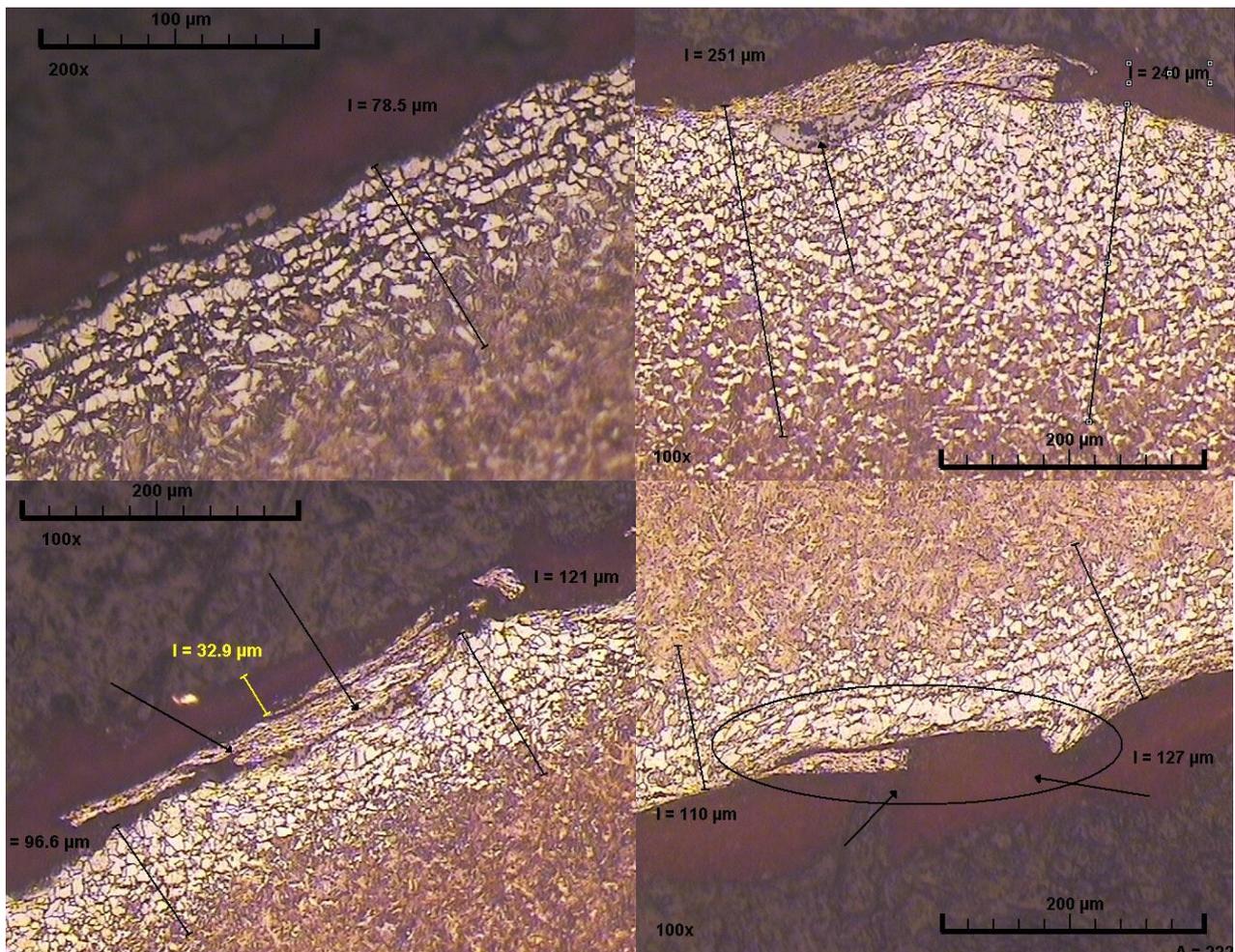


Рисунок 3 – Микроструктура стали лемеха «VULCAN»

2. Анализ лемеха «BELLOTA»

По результатам анализа материала лемеха «BELLOTA» установлено:

- что твёрдость поверхностного слоя 179 HV_{0,1};
- твёрдость центральной части 550 HV_{0,1} ~ 50 HRC;
- глубина крупнозернистого слоя (31,3...85,2) мкм.

Микроструктурным анализом на поверхности обнаружена крупнозернистая структура (рисунок 4). Феррит в микроструктуре располагается не только по границам крупных зёрен, но и по кристаллографическим плоскостям самих зёрен. Видманштеттенова структура характерна весьма низкими механическими свойствами, образуется при перегреве стали или при медленном охлаждении стального литья. Видманштеттенова структура – неисправимый брак.

Дополнительно на спектрометре ARL – 3460 было проверено содержание углерода на поверхности, оно составило 0,24 %.

По химическому составу материал лемеха «BELLOTA» соответствует стали 30Г, ГОСТ 1050 – 2013. Содержание углерода согласно ГОСТ 1050 составляет (0,27 – 0,35) % ÷ 0,01 %, т. е. можно сказать о незначительном обезуглероживании. По данным [6], материал лемеха «BELLOTA» должна быть высокопрочная борированная сталь 28MnB5, но полученные данные показывают обратное и с уверенностью можно утверждать, что образец, подвергнутый анализу, не является оригинальным изделием данного производителя.

В этом случае ускоренный износ происходит за счёт крупнозернистого зерна на поверхности, который снижает ударную вязкость стали и повышает температуру перехода в хрупкое состояние.

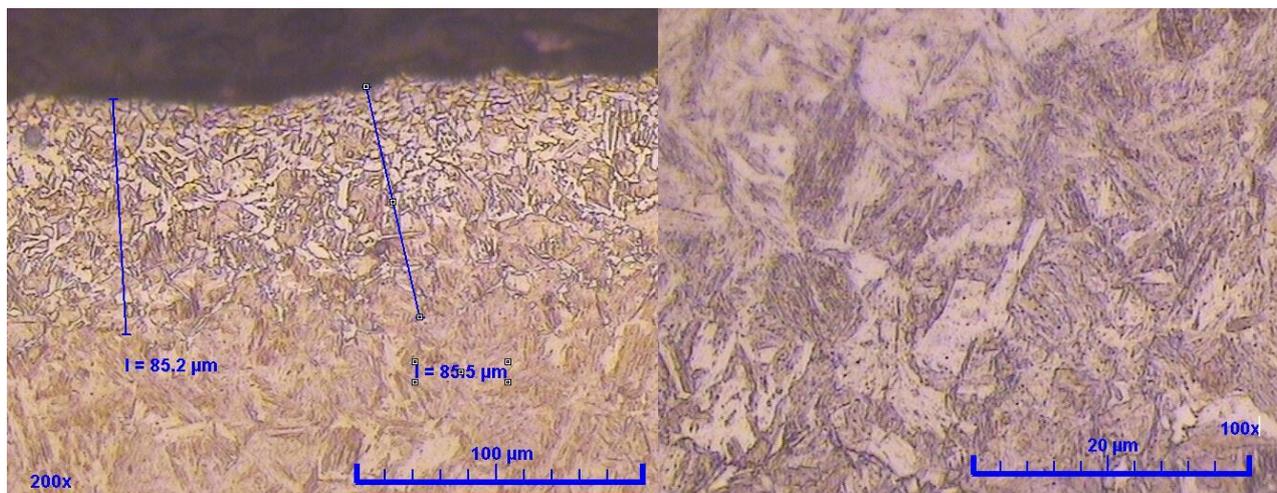


Рисунок 4 – Микроструктура стали лемеха «BELLOTA»

Заключение

Анализ результатов исследований показал, что стали, из которых изготовлены эти детали, имеют низкие эксплуатационные свойства и их использование для такого вида рабочих органов сельскохозяйственной обрабатывающей техники неэффективно. Можно предположить, что лемеха «VULCAN» и «BELLOTA» изготовлены из стали, полученной с нарушением технологии производства.

Учитывая, что лемеха из данной стали приобретены сельхозпредприятиями в больших объемах, предлагается увеличить их эксплуатационные характеристики путем наварки на рабочую зону лемехов специальных пластин из конструкционной стали и наплавкой высокопрочного чугуна [4, 5].

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Голубина, С. А. Повышение износостойкости отвалов плугов полуавтоматической вибродуговой наплавкой: дис. ... канд. техн. наук : 05.20.03 / С. А. Голубина. – Калуга, 2016. – 138 с.
2. Ткачев, В. Н. Работоспособность деталей машин в условиях абразивного изнашивания / В. Н. Ткачев. – М. : Машиностроение, 1995. – 336 с.
3. Геометрическая форма и размеры лемехов и отклонение длины лемеха (лезвия) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://mehmanxona.ru/tehnologii/vidy-lemehov.html>. – Дата доступа: 12.09.2022.
4. Антонишин, Ю. Т. Повышение эксплуатационных характеристик рабочих органов почвообрабатывающих машин / Ю. Т. Антонишин, В. А. Сокол // Инновационные технологии в производстве сельскохозяйственной продукции: сборник науч. статей Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 2–3 июня 2015 г. – Минск : БГАТУ, 2015. – С. 253–259.
5. Кондратьев, Е. Т. Восстановление наплавкой деталей сельскохозяйственных машин / Е. Т. Кондратьев, В. Е. Кондратьев. – М. : Агропромиздат, 1989. – 95 с.

6. Лемех ПЛЖ (Bellota) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://agrotrakshop.ru/catalog/plugi_obshchego_naznacheniya/lemekh_plzh_bellota/?ysclid=l95bhbi1lm795139529. – Дата доступа: 12.09.2022.

УДК 621.791

ПРИМЕНЕНИЕ ДВИЖУЩЕГОСЯ ПЛАЗМЕННОГО ИСТОЧНИКА НАГРЕВА ДЛЯ УПРОЧНЕНИЯ ИЗДЕЛИЙ ИЗ СТАЛЕЙ И ЧУГУНА

*Хвисевич В. М.¹, Сазонов М. И.¹, Веремейчик А. И.¹,
Онысько С. Р.¹, Есипчук С. М.²*

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

*2) Университет штата Сан-Паулу «Жулио Де Мескита Фильо» (UNESP),
г. Сан-Паулу, Бразилия*

Введение

В машиностроительной отрасли для изготовления деталей машин и механизмов различного назначения, как правило, используются дешевые низколегированные, легированные стали и чугун.

Эксплуатационный ресурс изделий из этих материалов не отвечает соответствующим требованиям производства, обусловленными затратами на их ремонт, содержание, запасные части и утилизацию.

Как известно, для увеличения срока службы изделий применяют соответствующие упрочняющие технологии, основными из которых являются механическая, химическая и термическая обработки.

На основе анализа литературных источников в этой области следует, что наибольшее практическое применение для решения такой проблемы получили термические методы упрочнения: объемная закалка, применение ТВЧ, лазерных и плазменных источников, электронно-лучевых и катодно-дуговых методов.

Как показала практика, для повышения эксплуатационных свойств быстро изнашивающихся изделий технология плазменного поверхностного упрочнения является наиболее доступной, рациональной, экономически и экологически эффективной по сравнению с другими технологиями упрочнения изделий концентрированными источниками нагрева: лазерными, электронно-лучевыми, катодно-дуговыми, где используется сложное и дорогостоящее оборудование, предъявляются высокие требования к техническому состоянию оборудования и упрочняемых деталей [1].

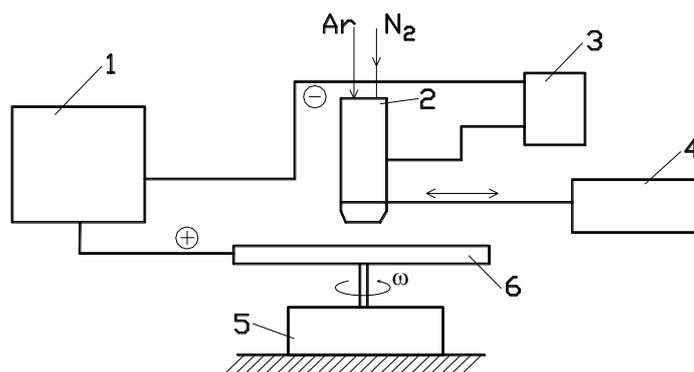
Информация о плазменном упрочнении появилась в 80-х годах XX века. Способы плазменного упрочнения, имея упомянутые достоинства, постоянно совершенствуются, что обусловлено необходимостью разработки новых методик для получения оптимальных характеристик генераторов плазмы и режимов технологических процессов упрочнения изделий из различных материалов.

В этой связи развитие и дальнейшее совершенствование этой технологии в настоящее время является актуальной задачей.

Сущность технологического процесса

Процесс поверхностного упрочнения осуществляется перемещением генератора плазмы постоянного тока с расчётной скоростью относительно рабочей поверхности детали, который генерирует плазменную дугу, взаимодействующую с поверхностью упрочняемой детали.

Если дуга горит между электродом плазмотрона и деталью, то ее принято называть дугой прямого действия. Когда дуга возбуждается между электродом и соплом плазмотрона, ее называют дугой косвенного действия или плазменной струей.



1 – силовой источник питания; 2 – модернизированный плазмотрон;
3 – высокочастотный генератор; 4 – манипулятор; 5 – манипулятор;
6 – упрочняемая деталь

Рисунок 1 – Принципиальная схема установки для поверхностного упрочнения

В результате скоростного локального нагрева поверхности детали плазменной дугой до высоких расчетных температур и дальнейшего охлаждения изделия, которое достигается высокоскоростным отводом тепла во внутренние его слои в материале происходят структурные превращения. Так как объем нагреваемого под дугой металла мал, происходит быстрый отвод тепла в не нагретые слои, тела. Исследования скоростей охлаждения, проведенные в работах Н. Н. Рыкалина [2]. Расчёты показали, что скорости охлаждения для сталей и чугуна существенно не различаются.

При воздействии высококонцентрированного источника тепла в зоне влияния образуется мартенситно-аустенитная структура. Следует заметить, что структурные превращения при плазменном упрочнении происходят в основном так же, как и при объемной закалке, однако высокие скорости нагрева и охлаждения приводят к увеличению плотности дислокаций и напряжений в кристаллической решетке, что существенно увеличивает твёрдость поверхностного слоя.

Так, например, твёрдость стали при объемной закалке 48 – 53 HRC, закалке ТВЧ 51 – 56 HRC, плазменной закалке 54 – 59 HRC.

Основное достоинство плазменной закалки в существенном увеличении твёрдости приповерхностного слоя изделия и сохранении исходных свойств металла в его внутренних слоях, что повышает сопротивление усталости и изнашиванию детали, что недостижимо при традиционных методах упрочнения.

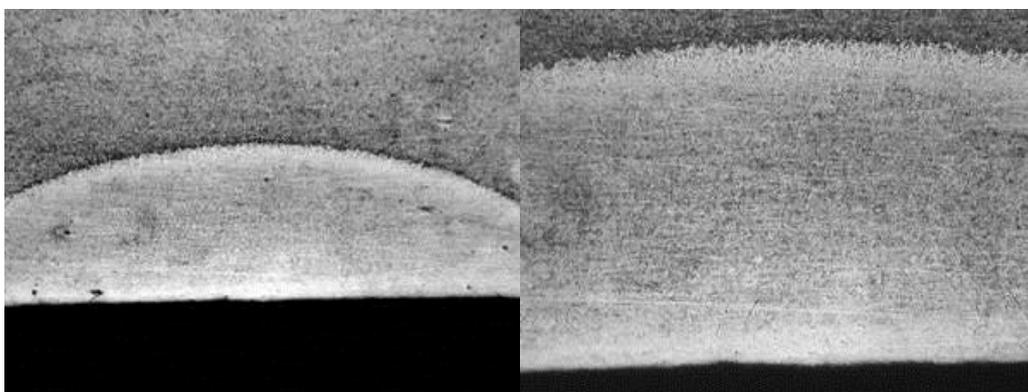
Отметим также, что глубина модифицированного слоя при воздействии плазменного источника нагрева варьируется от 0,5 до 2,5мм, ширина упрочняющей зоны от 5 до 15 мм [3].

Процесс плазменного упрочнения может осуществляться с оплавлением и без оплавления поверхности. Во втором случае упрочненная зона не требует финишной обработки.

Результаты исследования процесса

Проведена термообработка плазменной дугой образцов из стали 45 легированными хромистыми сталями 40Х и 14Х17Н2, а также чугуна ВЧ-100.

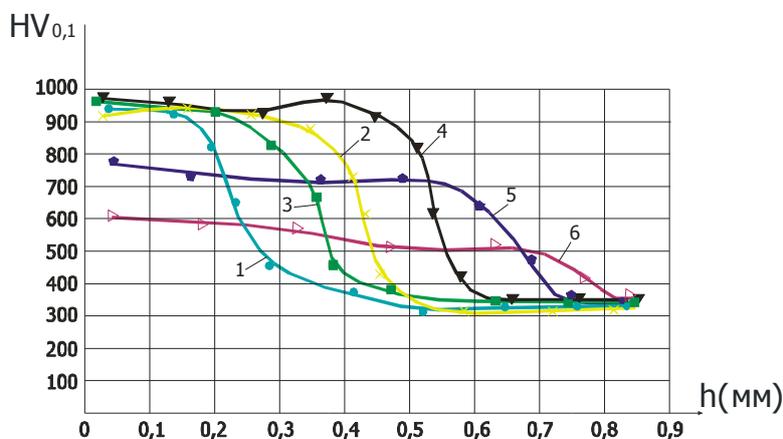
При термообработке образцов из стали 45 осуществляется высокоскоростной нагрев с быстрым охлаждением, что приводит к упрочнению зоны нагрева, т. е. в следствии оговоренных превращений создается слой с высокой степенью дискретности мартенсита. Рассматриваемая сталь содержит менее 0,5 % углерода и при фазовых превращениях его кристаллы имеют форму пластин.



а) зона влияния плазменной струи; $\times 45$,
б) микроструктура зоны нагрева; $\times 180$

Рисунок 2 – Микроструктура стали 45 при термообработке в среде аргона

Ниже на рисунке 3 показано распределение микротвердости стали 45 по глубине упрочняемого слоя.



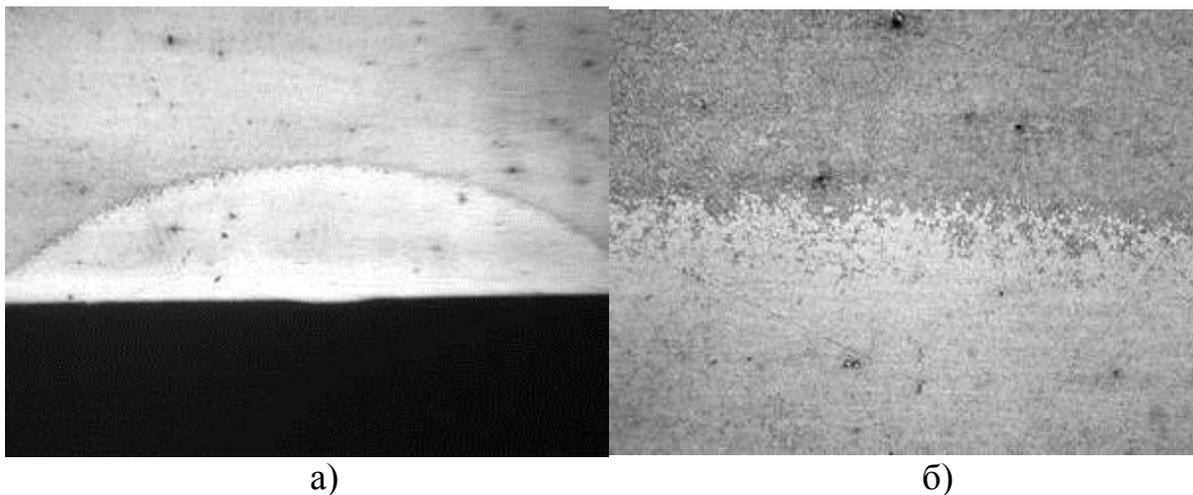
1 – $V = 20$ мм/с; 2 – $V = 16,7$ мм/с; 3 – $V = 13,36$ мм/с;
4 – $V = 11,7$ мм/с; 5 – $V = 10$ мм/с; 6 – $V = 4,2$ мм/с

Рисунок 3 – Зависимости распределения микротвердости стали 45 по глубине поверхностного слоя

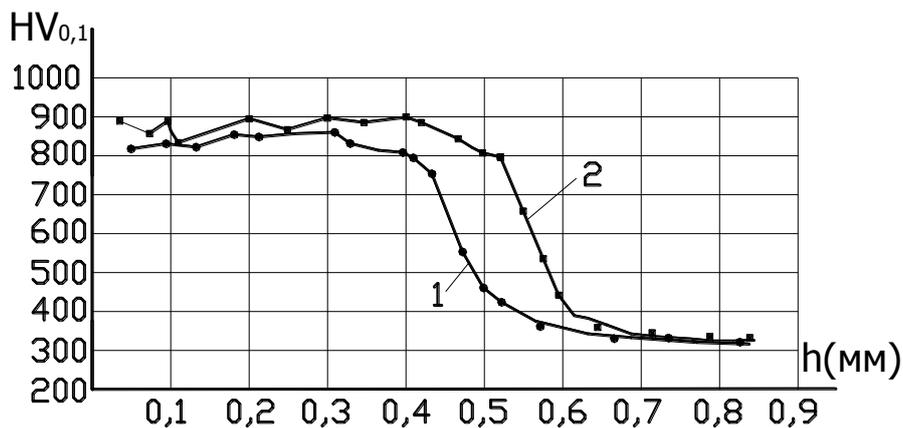
Проведена термообработка образцов из легированных сталей 40X и 14X17H2 в среде азота.

Сталь 40X

Металлографический анализ показал, что структура стали изменена по сравнению с исходной и состоит из характерных зон. В упрочненном слое наблюдается высокодисперсный мартенсит, далее нерегулярный мартенсит с остаточным аустенитом, а затем зона с фрагментами карбидов. По сравнению со сталью 45 для стали 40X скорость процесса превращения замедляется, что объясняется устойчивостью аустенита к распаду в таких сталях и наличием легирующих элементов хрома и вольфрама.



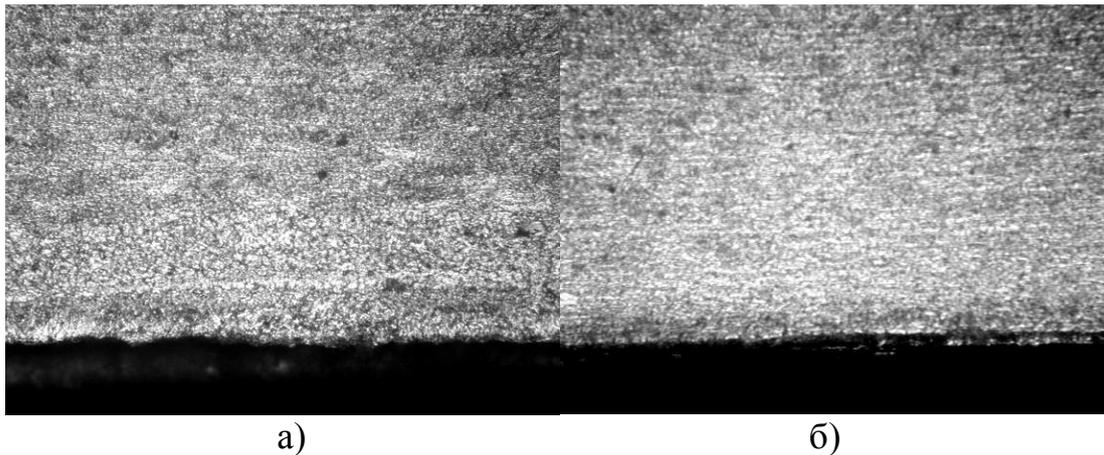
а) увеличение x36; б) увеличение x180
Рисунок 4 – Микроструктура стали 40X



1 – с оплавлением; 2 – без оплавления
Рисунок 5 – Характер распределения микротвердости по глубине поверхностного слоя стали 40X (защитный газ азот)

Здесь глубина упрочненного слоя составляет 0,6 мм. Наибольшее значение микротвердости упрочненного слоя превышает ее значение для исходного материала более чем в два раза.

Сталь 14X17H2

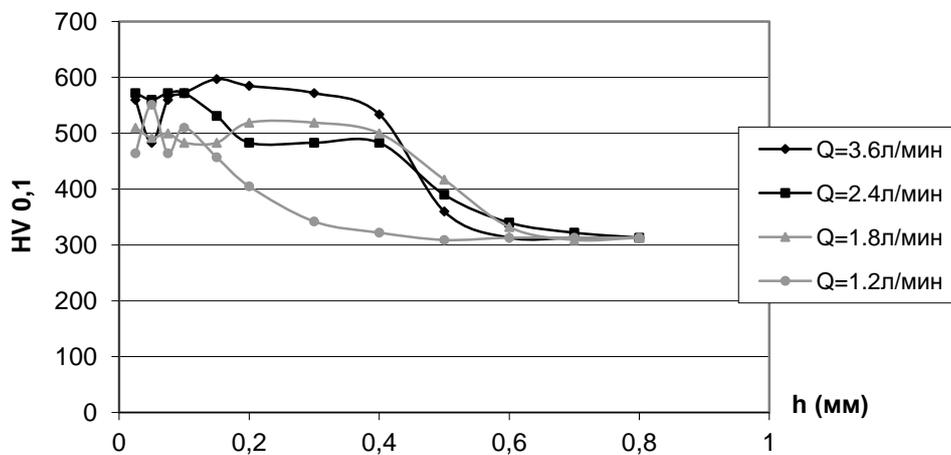


а) $Q_{N_2} = 1,8$ л/мин; б) $Q_{N_2} = 1,2$ л/мин

Рисунок 6 – Микроструктура стали 14X17H2 (защитный газ азот)

Анализ результатов рентгеноструктурных исследований показал, что с применением среды азота в фазовом составе образовался нитрид железа Fe_3N , что объясняется диффузионным насыщением азотом исходного материала.

На рисунке 7 приведено распределение микротвердости по глубине упрочненного слоя.



1 – Q = 3.6 л/мин; 2 – Q = 2.4 л/мин; 3 – Q = 1.8 л/мин; 4 – Q = 1.2 л/мин

Рисунок 7 – Характер распределения микротвердости по глубине поверхностного слоя при различных расходах защитного газа азота

Исследования показали, что глубина упрочненного слоя достигает ~0,55 мм, микротвердость выше почти в два раза микротвердости стали в исходном состоянии.

Высокопрочный чугуун ВЧ-100

Высокопрочный чугуун ВЧ-100 по форме включения содержит шаровидный графит в сочетании с пластинчатым в виде мелких включений (рисунок 8а).

После термообработки микроструктура чугуна изменилась (рисунок 8б). Произошло растворение шаровидного графита, а пластинчатый принял вид мелких включений, т. е. произошел так называемый «белый излом» с образованием отбеленных слоев, характеризующихся низкой вязкостью.

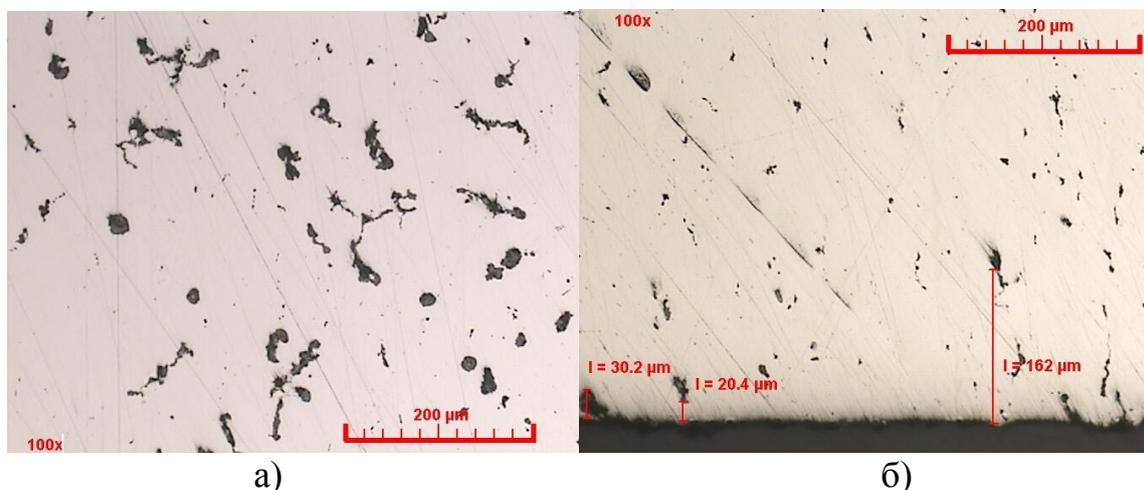


Рисунок 8 – Микроструктура высокопрочного чугуна ВЧ 100

Микротвердость упрочненных образцов увеличилась почти в 1,3 раза по сравнению с исходным состоянием.

Заключение

По результатам плазменного поверхностного упрочнения сталей и чугуна следует заключить:

- в процессе термообработки высококонцентрированным источником энергии за счёт высоких скоростей нагрева и охлаждения в упрочняемых деталях как стальных, так и чугунных, формируется поверхностный слой структуры, свойства которого недостижимы для традиционных способов упрочнения (объемная закалка, ТВЧ и др.);
- достигается высокая производительность процесса;
- при упрочнении без оплавления не требуется финишной обработки рабочей поверхности детали;
- появление в упрочнённом слое сжимающих напряжений и остаточного аустенита исключает процесс трещинообразования деталей;
- минимальные деформации деталей при термообработке позволяют повысить точность их изготовления;
- достигается высокий КПД нагрева даже при сравнении с лазерной закалкой;
- плазменная установка является мобильной, отличается простотой эксплуатации и обслуживания;
- ресурс работы упрочнённых деталей повышается в 1,5–2 раза.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Поверхностное упрочнение сталей плазменной закалкой / В. А. Линник [и др.] // *Металловедение и термическая обработка металлов.* – 1983. – № 4. – С. 2–4.
2. Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов: Справочник / Н. Н. Рыкалин [и др.] – М. : Машиностроение, 1985. – 496 с.

3. Коротков, В. А. Исследование влияния скорости охлаждения на качество поверхностного слоя при плазменной закалке / В. А. Коротков, С. П. Ананьев, А. В. Шакуров // Сварочное производство. – 2012. – № 3. – С. 23–27.

УДК 536.2

ВЛИЯНИЕ ФОРМЫ ВЫХОДНОГО СЕЧЕНИЯ СОПЛА ИСТОЧНИКА ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СТРУИ НА УРОВНИ ТЕМПЕРАТУРЫ В ЗОНЕ ТЕРМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

Веремейчик А. И., Холодарь Б. Г.

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

Воздействие на элементы машин и механизмов подвижным тепловым потоком высокой интенсивности используется для модификации свойств материалов в приповерхностной зоне. Задачей воздействия является целенаправленное изменение фазового состава материала и его микроструктуры, что в свою очередь ведет к требуемому улучшению механических свойств материала. При этом основным вопросом является подбор оптимального режима теплового нагружения, который зависит прежде всего от уровня и скорости нагрева и следующего за ним охлаждения тела. В связи с этим расчеты температурных полей в соответствующих зонах материала имеют первостепенное значение.

Известно, что значительная трансформация материала в зоне термического воздействия происходит на небольших глубинах, составляющих в большинстве случаев доли миллиметра. Поэтому в качестве объекта теплового нагружения рассматривается обычно полупространство, что сводит к минимуму число граничных условий задачи и позволяет использовать для решения метод приложения мгновенных точечных источников тепла (метод Грина). Для такого источника энергии, расположенного в точке с координатами x_0, y_0, z_0 , температура в любой точке тела и в любой момент времени описывается выражением:

$$T(r,t) = \frac{Q}{8(\pi at)^{3/2}} \exp\left[-\frac{r^2}{4at}\right], \quad (1)$$

где Q – выделение тепла в точке в единицу времени, $a = \frac{\lambda}{c\rho}$ – коэффициент

температуропроводности, λ – коэффициент теплопроводности, c – удельная теплоемкость, ρ – плотность материала, t – время, $r^2 = (x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + (z-z_0)^2$ – расстояние до рассматриваемой точки. Здесь T – приращение температуры над исходным уровнем температуры тела в данной точке (для удобства далее принимаем одинаковым во всех точках).

Поскольку для реальных источников тепловое воздействие распределено по некоторой поверхности (объему) тела, необходимо рассматривать действие совокупности точечных источников, что приводит к необходимости интегрирования выражения (1) в пределах этой поверхности (объема):

$$T_s(r, t) = \int \left(\int T(r, t) ds \right) d\xi, \quad (2)$$

где ξ – переменная интегрирования по времени от начального значения $\xi=0$.

Естественно, что этот способ удобен для случая, когда возможен подход теории линейной теплопроводности, что далее принимается.

Для движущихся источников энергии при вычислениях должна быть задана конкретная траектория движения зоны прямого теплового воздействия. В простейшем случае движения источника вдоль оси Ox с постоянной скоростью V выражение (2) примет вид:

– для источника с нормально-круговым распределением интенсивности исходящего потока [1]:

$$T(x, y, z, t) = \left[2P_0 \exp\left(-\frac{Vx}{a}\right) (c\gamma(4\pi a)^{3/2}) \right] \times \\ \times \int_0^t \frac{1}{\sqrt{\xi}(t_0 + \xi)} \exp\left[-\frac{z^2}{4a\xi} - \frac{r^2}{4a(t_0 + \xi)} - \frac{V^2(t_0 + \xi)}{4a}\right] d\xi, \quad (3)$$

– для источника с равномерно-распределенным по прямоугольной площадке потоком:

$$T(x, y, z, t) = \frac{q}{8\rho c\sqrt{\pi a}} \int_0^w \exp\left(-\frac{z}{w}\right)^2 F_x F_y dw, \quad (4)$$

где q – интенсивность теплового потока, $w = \sqrt{4at}$,

$$F_x = \Phi\left[\frac{x+b}{w} - \frac{V}{4a}w\right] - \Phi\left[\frac{x-b}{w} - \frac{V}{4a}w\right], \quad F_y = \Phi\left[\frac{y+l}{w}\right] - \Phi\left[\frac{y-l}{w}\right],$$

b, l – размер площадки вдоль осей x и y соответственно,

$$\Phi(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x \exp(-u^2) du \text{ – интеграл вероятности.}$$

Естественно, что фактическая форма поверхности приложения тепловой нагрузки должна в той или иной степени сказаться на результатах вычислений, поскольку тепловая задача, как это имеет место и во всей механике сплошной среды, подчиняется известному принципу Сен-Венана.

В таблице 1 приведены результаты расчетов максимальной температуры в нескольких точках тела (по глубине z и ширине y), расположенных в плоскости, перпендикулярной оси движения Ox . Поверхность воздействия задавалась в виде прямоугольника и круга, площади которых одинаковы ($A = 9 \text{ мм}^2$). Прямоугольная площадка имела стороны 4.25 и 2.0 мм, которые могут быть ориентированы широкой стороной либо перпендикулярно оси движения источника, либо параллельно ей, для квадрата сторона составляет 3 мм, радиус сечения для круга $R \approx 1.69 \text{ мм}$.

Числовые значения термодинамических параметров задачи соответствуют стали 40X13 и составляют: плотность материала $\rho = 7860 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$, тепло-

емкость $c = 745 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}$, коэффициент теплопроводности $\lambda = 38 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot ^\circ\text{C}}$, температура плавления $T_{пл} = 1550 ^\circ\text{C}$. Эффективная мощность источника $P_0 = 1000 \text{ Вт}$, скорость движения $V = 700 \text{ мм/мин} = 1.17 \text{ см/с}$, положение расчетных точек на траектории соответствует координате $x \approx 8.1 \text{ см}$.

Еще раз подчеркнем, что формулы (3), (4) непосредственно подходят только для случая постоянных термодинамических характеристик, поэтому указанные константы материала приняты по рекомендации [1, 2] соответствующими температуре $T = 900 ^\circ\text{C}$.

Таблица 1 – Максимальная температура в точках тела

Форма пятна нагрева	Максимальная температура в точках с координатами, мм						
	$y = 0;$ $z = 0$	$y = 0;$ $z = 0.25$	$y = 0;$ $z = 0.5$	$y = 0;$ $z = 0.75$	$y = 0;$ $z = 1.0$	$y = 2.0;$ $z = 0$	$y = 4.0;$ $z = 0$
Прямоугольник ↑X 	1650.0 0.38	1309.3 0.33	1041.8 0.24	830.4 0.09	665.5	791.3	111.7
Прямоугольник ↑X 	1481.2 0.25	1181.6 0.21	927.9 0.14	735.3	589.4	368.7	102.1
Квадрат ↑X 	1595.0 0.31	1290.0 0.26	1022.7 0.20	812.8 0.04	649.2	449.0	105.2
Круг ↑X 	1286.6 0.49	1105.1 0.42	942.1 0.31	807.0	694.6	894.2 0.24	325.6

В случаях, когда максимальная температура в точке превышает $850 ^\circ\text{C}$, в таблице 1 под ней указан интервал этого превышения (с).

Для большей наглядности на рисунках 1, 2 представлены зависимости максимальной температуры от координат для различных форм пятна нагрева.

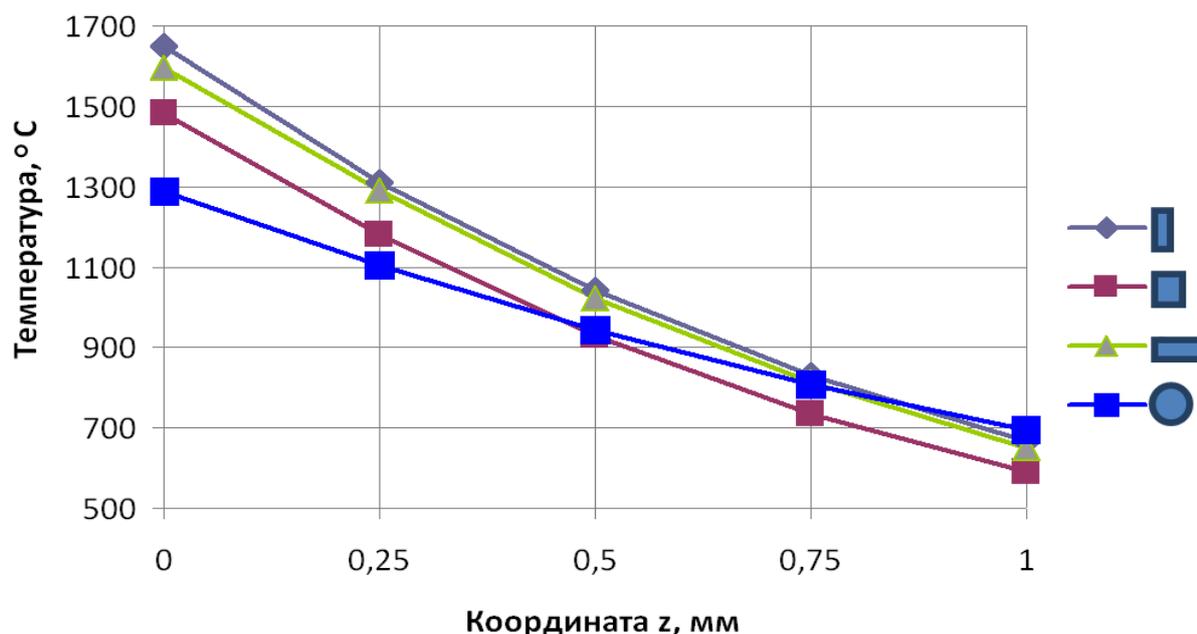


Рисунок 1 – Зависимость максимальной температуры от координаты z

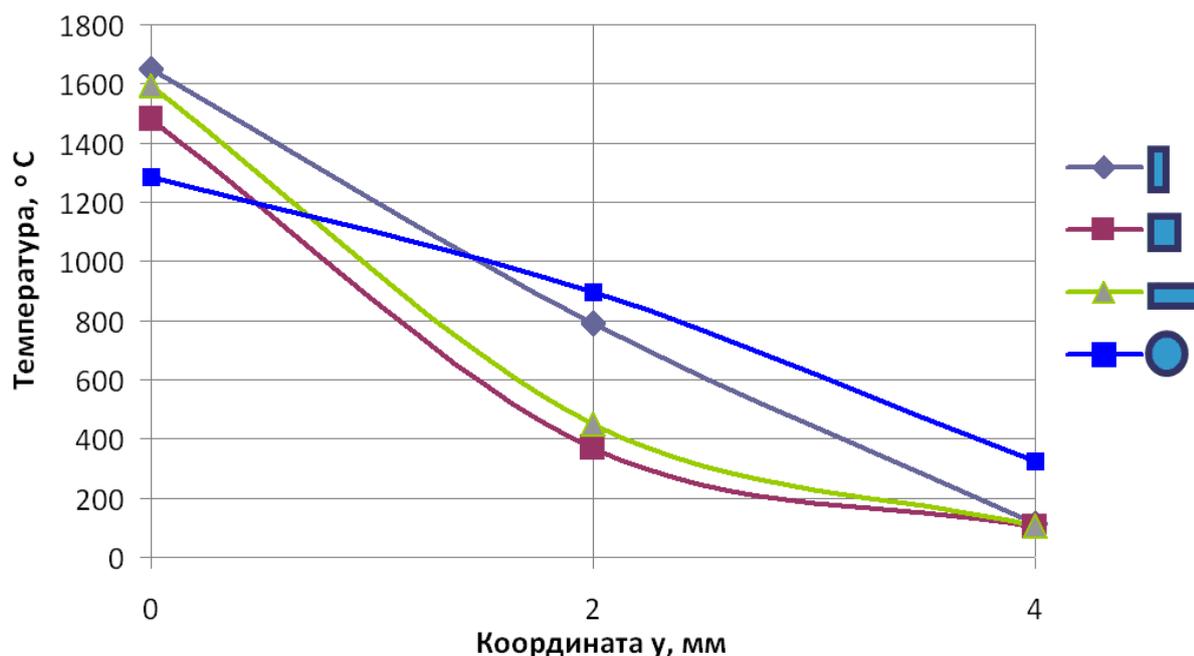


Рисунок 2 – Зависимость максимальной температуры от координаты y

Из результатов расчетов видно, что форма пятна нагрева оказывает существенное влияние на величину максимальной температуры, но ее роль падает при удалении от центра нагрева даже для таких небольших отклонений, как приняты в таблице 1, о чем можно судить по соотношению между температурами при $y = 2$ с и $y = 4$ с их значениями при $y = 0$ для разных форм пятна нагрева.

Распределение максимальной температуры по глубине z для рассмотренных случаев форм пятна нагрева имеет одинаковый вид для рассмотренных термодинамических параметров с тем отличием, что для прямоугольного и квадратного сечений изменение максимальной температуры на глубине 1 мм составляет 892...985 °С, а для круглого – 592 °С. Графики максимальной температуры по ширине y имеют нисходящий характер, причем для круглого отверстия кривая обращена выпуклостью вверх.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов: Справочник / Н. Н. Рыкалин [и др] – М. : Машиностроение, 1985. – 496 с.
2. Рыкалин, Н. Н. Расчеты тепловых процессов при сварке / Н. Н. Рыкалин. – М. : ГНТИ машиностроительной литературы, 1951. – 296 с.

**АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ
ПРОЕКТИРОВАНИЯ,
ПРОИЗВОДСТВА И ЭКСПЛУАТАЦИИ
АВТОМОБИЛЬНОГО ТРАНСПОРТА**

АНАЛИЗ СПОСОБОВ ПОВЫШЕНИЯ ПОПЕРЕЧНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ И УПРАВЛЯЕМОСТИ АВТОМОБИЛЯ ПРИ ДВИЖЕНИИ

Авдейчик Ю. А., Калугин Ю. К.

*Гродненский государственный университет имени Янки Купалы,
Гродно, Республика Беларусь*

Под устойчивостью машины понимается её способность сохранять заданное положение или движение без опрокидывания, скольжения и заноса. Устойчивость чаще всего ухудшается при движении с недопустимым поперечным или продольным уклоном, под воздействием центробежных и других сил (реакций), возникающих на поворотах и при заносах, наезде колеса мобильной машины на неподвижное препятствие [1, 2, 3]. Вследствие потери поперечной устойчивости чаще всего происходит опрокидывание автомобиля. Вопросами повышения устойчивости и предотвращения опрокидывания мобильной техники занимались В. С. Шкрабак, И. В. Величко, А. В. Войтиков, Э. С. Гаспарян и другие ученые [1, 2, 3]. Учитывая, что приоритетным направлением автомобилестроения является повышение безопасности движения, в современных автомобилях находят широкое применение адаптивные системы поддрессоривания, цель использования которых заключается в повышении устойчивости движения для различных дорожных условий и улучшения управляемости. Однако такие системы имеют сложную схемотехнику вследствие применения элементов саморегуляции. Как правило, в конструкции таких систем применяются электронные модули, которые имеют высокую стоимость, приводят к расходу дополнительной энергии, чувствительны к резкому изменению температуры, делают конструкцию более сложной, и, как следствие, менее надежной при работе в экстремальных условиях. Учитывая, что адаптивные системы применяются в автомобилях высшей ценовой категории, решение вопроса безопасности бюджетных автомобилей является в настоящее время актуальным. Целью данного исследования является анализ существующих способов повышения поперечной устойчивости и отыскание альтернативных решений, которые могут безопасно использоваться в большинстве моделей автомобилей.

К свойствам активной безопасности автомобиля относятся устойчивость движения, управляемость и тормозная динамика. Возможность прогнозирования этих свойств на этапе проектирования и учета их изменений в процессе эксплуатации позволяет сократить затраты на создание новых машин и проведение ремонтных и пусконаладочных работ. Важное значение имеют также и факторы, характеризующие динамические свойства автомобиля. К таким факторам относится поперечная устойчивость автотранспортных средств. При проектном моделировании устойчивости движения автомобиля производится выбор конструктивных параметров элементов шасси (колес, шин, подвески, рулевого управления) на основе прогнозирования выполнения автомобилем стандартных тестов, теоретических и расчетных методик. Для этих целей исполь-

зуют проверенные методики, получившие признание при проведении многочисленных испытаний. Основываясь на результатах научных публикаций различных авторов [1, 2, 4], можно сгруппировать основные способы повышения устойчивости автомобиля и представить их в виде структурной схемы (рисунок 1).



Рисунок – 1 Типичные способы повышения устойчивости автомобиля

Анализируя приведенную структурную схему, можно выделить основные способы повышения поперечной устойчивости автомобилей, связанные с работой механизмов, износом рабочих частей автомобиля и соблюдении техники вождения.

Способы, связанные с изменением конструкции автомобиля

Среди таких способов можно отметить возможность изменения ширины колеи (рисунок 2).

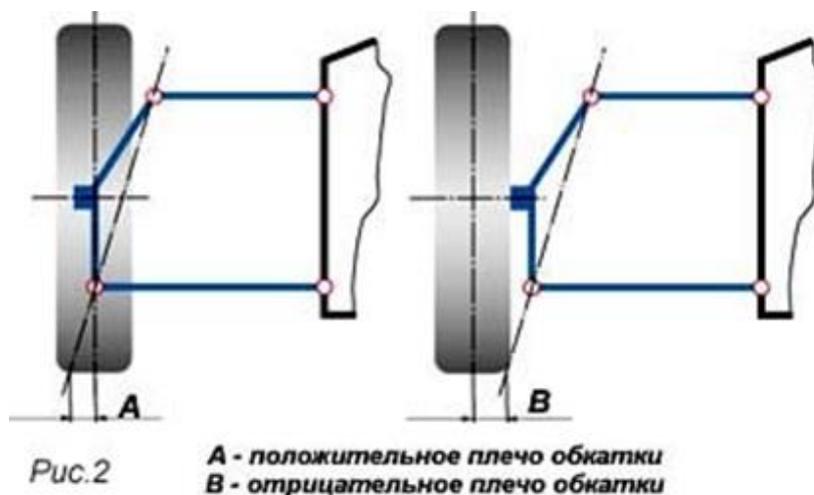


Рисунок 2 – Схема расширения колеи

Несмотря на определенный эффект повышения устойчивости, этот способ имеет больше негативных последствий [5]. Увеличение этого параметра негативно сказывается на рулевом управлении – требуется применение значительно большей силы для поворота рулевого колеса, в большей степени ощущаются дефекты дорожного покрытия, а также разгон и торможение. Такие изменения более эффективны при увеличении ширины колеса по направлению внутрь колесной арки. На практике отмечено, что подобные виды модернизации могут пагубно повлиять на ступичные подшипники, рулевые наконечники, шаровые опоры и другие элементы подвески.

Уменьшение высоты центра тяжести автомобиля, как правило, приводит к снижению опрокидывающего момента. Это позволяет проходить повороты и резкие перестроения на большей скорости, кроме того, уменьшается амплитуда колебательных движений корпуса при ускорении и торможении и улучшается управляемость. Есть и недостатки такой модернизации – движение на автомобилях с заниженным клиренсом без нанесения ущерба элементам кузова и подвески возможно только по ровным дорогам. Даже преодоление «лежачего полицейского» или невысокого бордюра становится весьма проблематичным (не говоря уже про поездки на дачу при «полной» загрузке транспортного средства).

Способы, связанные с износом автомобиля и нарушением условий эксплуатации

Повысить устойчивость транспортного средства можно посредством увеличения коэффициента сцепления шин. Исходя из данных научных источников, при использовании шин с изношенной наружной частью коэффициент сцепления может уменьшиться в 2 раза.

Уменьшить аварийность и повысить устойчивость автомобилей можно при использовании качественного дорожного покрытия. Для безопасного движения по кособокому и на виражах коэффициент сцепления должен составлять 0,4 ... 0,45. При меньших значениях коэффициента может произойти блокировка передних и задних колес.

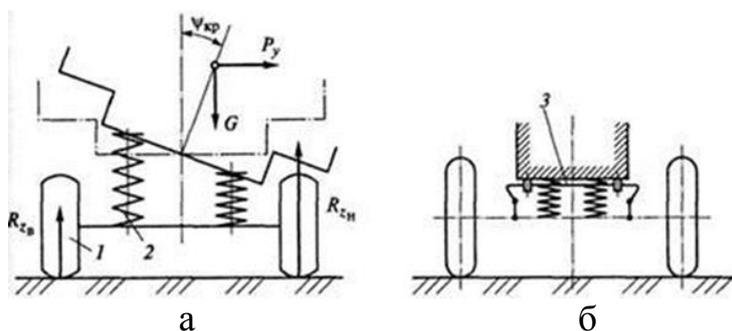
В некоторых случаях водители неправильно укладывают груз. При повороте в таких случаях возникают центробежные силы, направление которых может способствовать отклонению от курса или опрокидыванию автомобиля. Для предотвращения негативного воздействия и нормализации центров масс необходимо, чтобы центр тяжести груза совпадал с продольной осью автомобиля.

Способы, связанные с работой механизмов

Неравномерное распределение сил трения при торможении может вызвать нарушение поперечной устойчивости при движении автомобиля в критических условиях. Для повышения устойчивости при торможении необходимо отрегулировать тормозной механизм и проверить чистоту поверхности тормозных дисков на предмет замасливания. Рассмотренный способ напрямую зависит от состояния тормозных дисков. Исходя из геометрической схемы траектории автомобиля при движении на повороте можно предположить, что влияние передних тормозных механизмов значительно опаснее, чем задних.

Наибольший интерес с точки зрения моделирования и расчета прикладной задачи представляет применение стабилизаторов поперечной устойчивости, которые могут входить в состав подвески автомобиля. Для большей наглядности

принято считать, что в состав автомобиля входит подрессоренный элемент – кузов и элементы, которые не подрессорены – это колеса и мосты. Эти узлы связаны между собой с помощью подвески (рисунок 2).

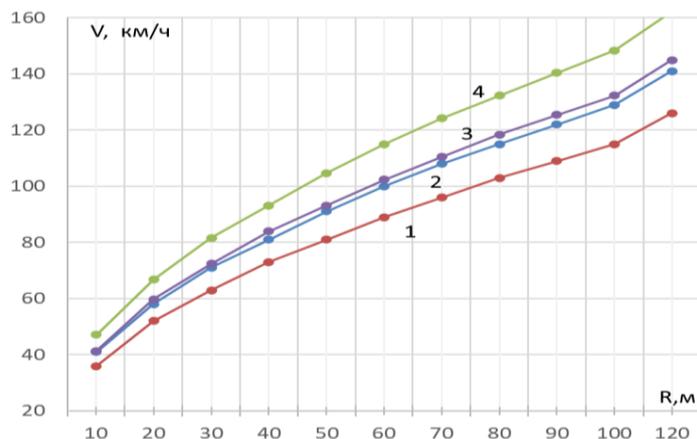


а – подвеска без стабилизатора;

б – подвеска с встроенным стабилизатором поперечной устойчивости

Рисунок 3 – Изменение поперечной устойчивости автомобиля

Подвеска в данном случае представляет собой систему масс. Взаимодействие этих масс происходит по математическим законам, которые описываются с помощью систем уравнений. При различных режимах движения автомобиля, а именно торможении, повороте, разгоне, а также перемещении по неровностям дороги, вследствие действия боковой силы, шины и упругие элементы подвески разгружаются с одной стороны, а с другой – нагружаются [4, 5]. В результате использования такого стабилизатора удастся уменьшить значения критической скорости и критического угла на 10...15 %. Диаграмма изменения критической скорости автомобиля на участке с наклонной плоскостью с использованием стабилизатора поперечной устойчивости и без него показана на рисунке 3.



1, 2 – изменение критической скорости автомобиля (без стабилизатора);

3, 4 – изменение критической скорости автомобиля (с применением стабилизатора)

Рисунок 3 – Графики изменения критической скорости автомобиля на наклонном участке с коэффициентами поперечной устойчивости ($K = 1,06; 1,4$)

Закключение

Анализируя представленные выше способы повышения поперечной устойчивости, можно сделать вывод, что наиболее эффективными из них являются способы, направленные на улучшение условий эксплуатации и технического

обслуживания автомобилей, а также способов связанных с работой отдельных механизмов автомобиля. Рассматривая возможный подъем поперечной устойчивости посредством способов связанных с изменением конструкции автомобиля, нельзя обойти их существенные недостатки, связанные с затруднением управления автомобилем и преждевременным выходом из строя ответственных деталей. Для возможностей имитационного моделирования, на наш взгляд особый интерес представляет способ повышения поперечной устойчивости с помощью стабилизатора, введенного в конструкцию подвески. Ориентировочные результаты применения стабилизатора видны на графиках, и их можно регулировать с помощью изменения механических свойств элементов конструкции.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Вахламов, В. К. Автомобили. Основы конструкции: учебник – В. К. Вахламов. – М. : ИЦ «Академия», 2004. – 528 с.
2. Шкрабак, В. С. Противоопрокидывающее устройство для мобильных машин / В. С. Шкрабак // Охрана труда в сельском хозяйстве. – Научные труды Ленинградского сельскохозяйственного института. – Т. 402. – Ленинград-Пушкин, 1980.
3. Певзнер, Я. М. Теория устойчивости автомобиля / Я. М. Певзнер. – М. : Машгиз, 1947.
4. Тарасик, В. П. Теория движения автомобиля: учебник для вузов / В. П. Тарасик. – СПб : БХВ-Петербург, 2006. – 478 с.: ил.
5. Кравец, В. Н. Теория автомобиля: учеб. пособие / В. Н. Кравец. – Нижний Новгород : НГТУ, 2007. – 368 с.

УДК 62.529

ПРИМЕНЕНИЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ СОСТАВЛЕНИИ ОПЕРАТИВНО-СУТОЧНОГО ПЛАНА ТЕКУЩЕГО РЕМОНТА АВТОТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

Волощук А. А., Березуцкая С. О.

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

Для принятия решений по вопросам оперативно-производственного планирования, а также для организации работы по реализации этих планов требуется следующая информация:

- на каких постах ремонта должны выполняться работы;
- какова технологическая последовательность и плановое время выполнения этих работ на каждом посту.

Необходимая информация представляется в виде двух характеристик требований на технические воздействия – диспетчерской и технологической.

Под диспетчерской характеристикой требования понимается содержащееся в ней сочетание работ с указанием планового времени их выполнения. Под технологической характеристикой требования – соответствие специализированным постам, участкам и совокупность технологических очередностей выполнения отдельных видов работ, содержащихся в диспетчерской характеристике рассматриваемого требования.

Процесс оперативно-производственного управления текущим ремонтом (ТР) автотранспортных средств (АТС) состоит из комплекса операций, выполняющихся в определенной последовательности и составляющих замкнутый технологический цикл, и имеет целью обеспечение выполнения заданий по ТР АТС с заданным уровнем качества при минимальных затратах. Достижение поставленной цели в значительной мере зависит от качества составления оперативно-производственного плана выполнения ТР на предстоящую смену и четкости его реализации [1].

Формирование описанных характеристик осуществляется в соответствии с алгоритмом, приведенным на рисунке 1.

В соответствии со схемой техник-оператор отдела оперативного управления (ООУ) принимает заполненный «Ремонтный листок», куда занесены проявления неисправностей, проверяет правильность занесения и шифровки исходных данных по АТС, пользуясь сборником справочников-шифраторов подвижного состава. Затем, используя классификатор соответствия внешних проявлений неисправностей и ремонтно-регулирующих операций, определяет фактические неисправности, описанные в данной заявке, и ремонтно-регулирующие операции, необходимые для их устранения. Последнее, что необходимо сделать для завершения обработки требования, это определить плановое время для выполнения работ на каждом из постов. Оно определяется в зависимости от нормативной трудоемкости, коэффициента организованности поста и числа работающих на посту.

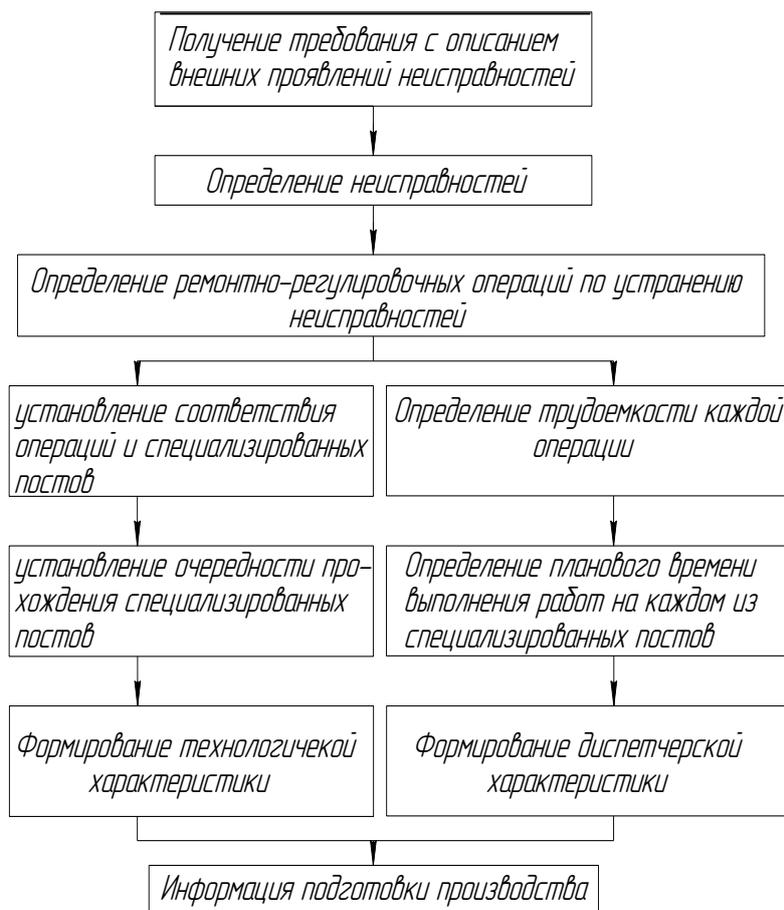


Рисунок 1 – Структурная схема алгоритма формирования диспетчерской и технологической характеристик требования

Нормативную трудоемкость техник-оператор определяет по классификатору ремонтно-регулирующих операций, значения коэффициента организованности для различных специализированных постов (участков, зон) данного предприятия определяются и корректируются раз в полгода, а количество работающих выбирается исходя из технологической целесообразности и наличия рабочих в данной смене.

Для автоматизации перечисленных выше процессов управления ТР было разработано программное обеспечение в среде MS Excel.

Алгоритм данного программного обеспечения представлен на рисунке 2.

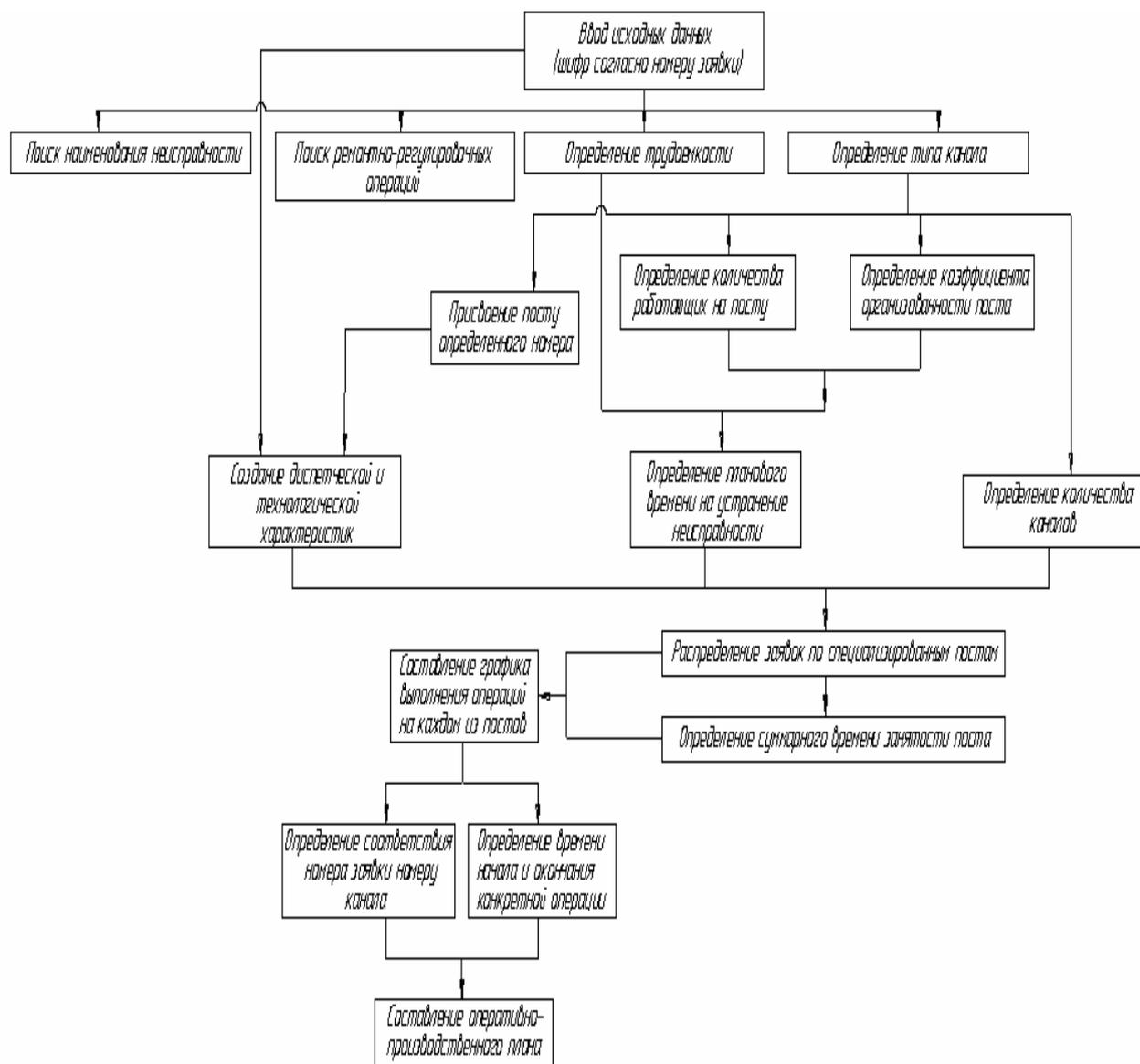


Рисунок 2 – Алгоритм программы

В качестве исходных данных выступает шифр неисправности, на основании которого производится поиск наименования неисправности, соответствующей ремонтно-регулирующей операции, а также нормативной трудоемкости и типа канала (ремонта электрооборудования, двигателя, трансмиссии, рулевого управления либо тормозной системы). В зависимости от типа канала определя-

ется количество работающих на посту, коэффициент организованности поста, а также число каналов обслуживания, входящих в состав поста.

Каждому типу поста присваивается определенный номер. Например, пост ремонта электрооборудования – № 1, тормозной системы – № 2, рулевого управления – № 3, трансмиссии – № 4, двигателя – № 5 и так далее.

На основании исходных данных (в данном случае номера заявки в соответствии с порядком поступления АТС в ремонт), а также в зависимости от номера поста, на котором будет обслуживаться требование, составляются диспетчерские и технологические характеристики, представляющие соответственно перечень операций и последовательность их проведения.

Далее осуществляется расстановка АТС по постам в зависимости от типа неисправности. При этом на постах, где имеется два канала, происходит проверка – занят ли предыдущий канал. В результате заявка поступает на свободный канал, что сокращает простои АТС в зоне ожидания, а также простои постов.

По результатам расстановки высчитывается суммарное время занятости поста, а затем составляется график ГР, в котором указывается распределение планового времени в соответствии с порядком постановки АТС на пост.

В конечном итоге путем обработки и систематизации моментов начала и окончания каждой конкретной операции составляется оперативно-производственный суточный план работ по текущему ремонту автотранспортных средств.

В процессе реализации программы используются логические и математические функции MS Excel: ЕСЛИ, ЕОШКА, ЕСЛИОШИБКА, ВПР, ГПР, СМЕЩ, И, ИЛИ, ОКРУГЛТ. Также применяются такие средства, как «Условное форматирование» и «Сортировка» [2].

Применение разработанного программного обеспечения позволит:

- снизить затраты времени, связанные с планированием работ по ГР;
- повысить точность планирования;
- автоматизировать создание и заполнение выходных документов;
- сократить бумажный документооборот на предприятии;
- увеличить время хранения отчетной документации;
- сократить затраты времени на доступ к архивным данным за требуемый период.

В результате повысится точность обработки и анализа информации, в значительной степени облегчится принятие управленческих решений, увеличится производительность труда, сократится время ремонта АТС на постах, а коэффициент технической готовности подвижного состава изменится в большую сторону.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Техническая эксплуатация автомобилей: учебник для вузов. (4-е изд., перераб. и доп.) / Е.С. Кузнецов [и др.] – М. : Наука, 2004. – 535 с.
2. Орвис, В. Excel для ученых, инженеров и студентов / В. Орвис – М. : Юниор, 1999. – 528 с.

ПОВЫШЕНИЕ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПЛАСТИЧНОЙ СМАЗКИ, ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ДЛЯ ТЯЖЕЛОНАГРУЖЕННЫХ УЗЛОВ ТРЕНИЯ АВТОМОБИЛЕЙ

Дудан А. В., Вигерина Т. В.

*Полоцкий государственный университет им. Евфросинии Полоцкой
г. Новополоцк, Республика Беларусь*

Подвеска грузового автомобиля работает в сложных условиях, все ее элементы испытывают большие нагрузки (в единицы и десятки тонн), поэтому их срок службы ограничен. Довольно часто отказывают балансиры МАЗ, кронштейны, рессоры, реактивные штанги, а также разнообразные сальники, уплотнители и иные компоненты. Наиболее частой неисправностью является появление трещин и изломов кронштейнов, балансиров и изнашивание втулок балансира. Износ втулки является распространенной причиной отказа балансира. Скорость изнашивания увеличивается при движении. Увеличение пространства между втулкой и осью влияет на рычаг управления, который откидывается от оси и деформирует детали. Номинальный зазор составляет 0,12–0,30 мм. Изношенные втулки следует заменять при достижении зазора между втулкой и осью в 1 мм.

Ресурс узлов трения в значительной степени определяется работоспособностью смазочных материалов. Современное развитие техники связано с повышением скоростей и нагрузок в узлах трения, что требует разработки новых смазочных материалов, обладающих повышенной нагрузочной способностью и обеспечивающих более низкую интенсивность изнашивания. В настоящее время получают все большее распространение попытки направленного улучшения свойств пластичных смазок введением третьего компонента (добавки) в состав пластичной смазки. Введенные в состав смазки разнообразные твердые добавки даже в случае выдавливания смазочного материала из зоны трения остаются в ней, образуя разделяющий слой, снижающий степень металлического контакта поверхностей.

Трибомеханическое модифицирование представляет собой финишную операцию обработки поверхности, предназначенную для окончательного формирования структурно-фазового состояния рабочей поверхности. Оно рекомендуется для применения преимущественно в узлах трения-скольжения (подшипники скольжения, опоры, направляющие и т. д.), для тяжело нагруженных узлов трения, работающих в условиях высоких нагрузок и вибраций (карьерная техника, железнодорожный транспорт, строительно-дорожные машины, сельхозтехника, дробилки, грохоты), для повышения качества узлов и деталей, подверженных сильному износу (штоки, узлы трения, подшипники, передачи, поршни, цилиндры ДВС и др.) [1–3].

Комплексная литиевая дисперсная фаза по сравнению с простой литиевой дисперсной фазой при одинаковых дисперсионных средах придает смазке следующие улучшенные качества [3]:

– возрастание несущей способности граничного слоя смазки в 2–3 раза, что позволяет повысить нагрузочные характеристики узла трения;

– повышение температуры каплепадения на 20–40 %, что дает возможность повысить допустимую температуру применения узла и механизма в целом;

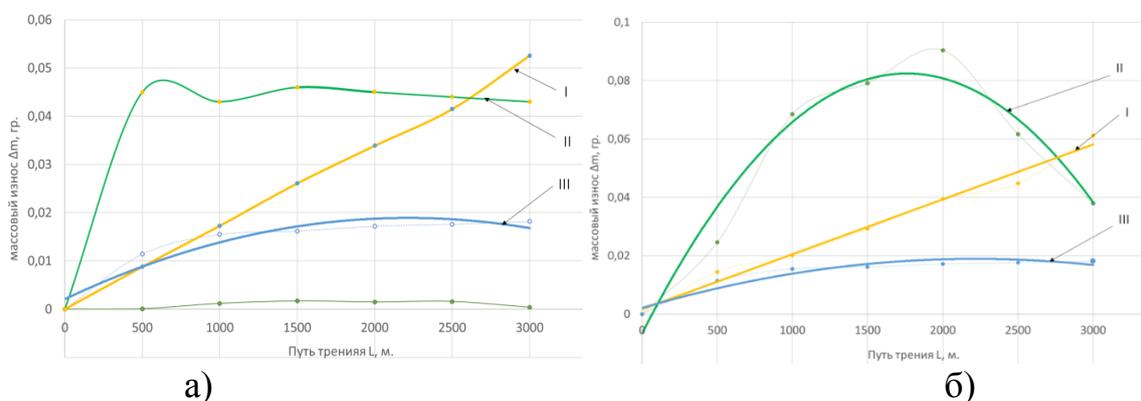
– увеличение механической стабильности в 1,5–2,0 раза, позволяющая ужесточать режимы работы узла без опасения разрушения и вытекания смазочного материала;

– общее повышение и переход на другой уровень всех остальных параметров смазки, приводящее к увеличению работоспособности смазочного материала, и как следствие, узла в целом.

Комплексная сульфат-кальциевая с добавками фторопласта и вязкостной присадкой за счет введения в состав мелкодисперсного фторопласта улучшает антифрикционные характеристики, повышает устойчивость в агрессивных средах (концентрированные кислоты и щелочи).

Целью данной работы являлось повышение триботехнических свойств пластичной смазки тяжело нагруженных узлов трения автомобилей за счет введения в литиевую и сульфат-кальциевую смазки приработочных добавок в виде пакета наноразмерных алмазов и фторопласта.

Результаты испытаний, приведенные на рисунке 1 (а, б), показали, что влияние модифицирующей добавки к смазке на процессы изнашивания зависит от давления. При относительно низком номинальном давлении 3 МПа износ образцов из бронзы БрО5Ц5С5 при трении в среде смазки модифицированной наноразмерными алмазами сопоставим с массовым износом образцов, испытываемых в смазке Литол-24 (рисунок 1а). Минимальным износом (~ 2 раза меньше) обладает образец, работающий в комплексной сульфат-кальциевой смазке с добавками фторопласта и вязкостной присадкой. С увеличением контактного давления до 6 МПа массовый износ для смазки с ультрадисперсной алмазографитовой шихтой (УДАГ) в 1,12 раз превышает износ Литол-24 и в 4 раза износ смазки с добавками фторопласта. Однако следует отметить, что при различных давлениях период приработки смазок с наночастицами завершается в интервале от 500 до 1500 м, тогда как приработка с использованием смазки Литол-24 достигает 5000 м. Повышение триботехнических свойств и снижение периода приработки при модифицировании пластичной смазки наноразмерными частицами может быть обусловлено как изменением физико-химических и реологических свойств смазочного материала (в частности повышением термостойкости и несущей способности масляной пленки), так и упрочнением поверхностных слоев пары трения за счет их интенсивного пластического деформирования в процессе трения со смазочным материалом, содержащим твердые частицы [4].

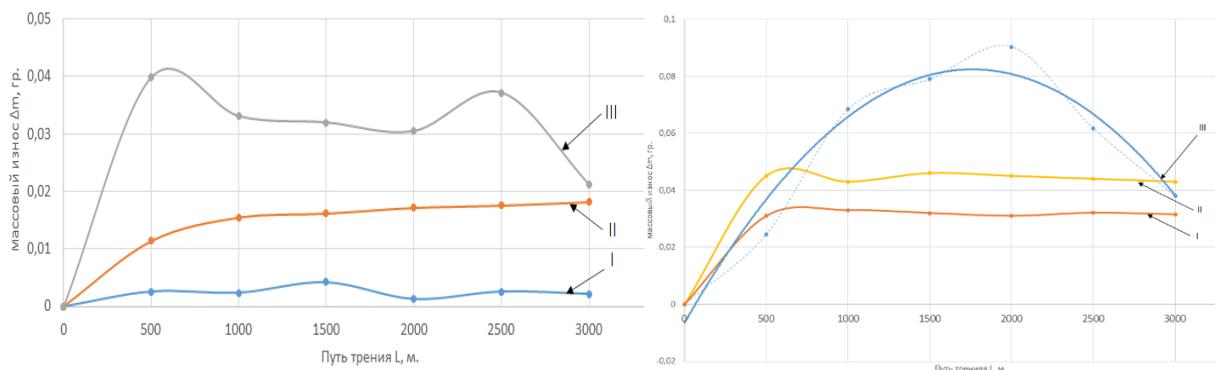


I – Литол-24; II- Комплексная литиевая смазка +1,0 мас. % ШИА-А;
III – Комплексная сульфат-кальциевая с добавками фторопласта и вязкостной присадкой
а) 3 МПа, б) 6 МПа

Рисунок 1 – Зависимость массового износа от пути трения при удельной нагрузке

В качестве причин противоизносного действия наноразмерных твердых частиц рассматривается упорядочение структуры смазочного материала под воздействием собственного заряда наноразмерных частиц. Причиной возникновения заряда является несовершенство их строения, появляющееся на стадии получения частиц, либо в процессе эксплуатации трибосопряжения (триборазрушения).

Увеличение номинальных давлений испытаний до 6 МПа приводит к увеличению массового износа образцов, работающих при одной и той же смазке (рисунок 2а, б).



I – 1,5 МПа; II – 3 МПа; III – 6 МПа

а) комплексная литиевая смазка +1,0 мас. % ША-А и б) комплексная сульфат-кальциевая с добавками фторопласта и вязкостной присадкой

Рисунок 2 – Зависимость массового износа от давления

Массовый износ при использовании комплексной сульфат-кальциевой смазки с добавками фторопласта и вязкостной присадкой на этапе приработки при увеличении удельной нагрузки с 1,5 до 6 МПа увеличился в 8 раз, а на этапе установившегося режима – в 5 раз. Испытания комплексной литиевой смазки +1,0 мас. % ША-А показали увеличения массового износа на первом этапе в 3 раза, на втором – в 2,5 раза.

Исследования влияния давления испытаний на режим приработки и триботехнические свойства фрикционной пары «бронза – сталь», проведенные при номинальном давлении испытаний равном 1,5; 3 и 6 МПа, показали, что максимальная износостойкость образцов на стадиях приработки и устоявшегося режима трения достигается при использовании комплексной сульфат-кальциевой смазки с добавками фторопласта и вязкостной присадкой. Одной из возможных причин указанного эффекта является формирование на поверхности бронзы разделительного слоя с повышенной нагрузочной способностью и расширенным диапазоном рабочих температур. Использование комплексной литиевой смазки с шихтой УДАГ сокращает период приработки на всех указанных режимах и эффективна при удельной нагрузке, не превышающем 3 МПа.

Заключение

Показано, что повышение триботехнических свойств пластичной смазки может быть достигнуто введением в ее состав пакета нано- и микроразмерных добавок. Исследования подтвердили, что износостойкость пар трения увеличивается, а период приработки снижается при использовании комплексных сма-

зок. Получены графические зависимости влияния удельной нагрузки испытаний на триботехнические свойства пары трения «бронза – сталь», показывающее, что максимальная износостойкость образцов на стадиях приработки и устоявшегося режима трения достигается при использовании комплексной сульфат-кальциевая смазки с добавками фторопласта и вязкостной присадкой. Использование комплексной литиевой смазка с ультрадисперсной алмазографитовой шихтой сокращает период приработки на всех указанных режимах и эффективна при удельной нагрузке, не превышающей 3 МПа. Смазка Литол-24 обеспечивает износостойкость на уровне литиевой смазки с алмазографитовой шихтой, но при этом период приработки пары трения увеличивается до 3,5–4 раз.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Леонтьев, Л. Б. Системный анализ технологии формирования износостойких покрытий на поверхностях трения деталей / Л. Б. Леонтьев, А. Л. Леонтьев, В. Н. Макаров // *Фундаментальные исследования*. – 2014. – № 12 (часть 4). – С. 729–734.

2. Модифицирование материалов покрытий наноразмерными алмазосодержащими добавками / П. А Витязь [и др.]. – Минск : Беларус. навука, 2011. – 527 с.

3. Наноалмазы детонационного синтеза: получение и применение / П. А Витязь [и др.]; под общ. реакцией П. А Витязя. – Минск : Беларус. навука, 2013. – 381 с.

4. Повышение износостойкости деталей тяжело нагруженных узлов трения автомобилей / А. В. Дудан [и др.] // *Вестник ПГУ. Серия В. Промышленность. Прикладные науки*. – 2022. – № 10. С. 25–30.

УДК 629.331.08(075.32)

ОПЫТ ПОДГОТОВКИ ИНЖЕНЕРОВ ПО АВТОТРАНСПОРТНЫМ СПЕЦИАЛЬНОСТЯМ

Иванов В. П., Вигерина Т. В.

*Полоцкий государственный университет им. Евфросинии Полоцкой
г. Новополоцк, Республика Беларусь*

На учете в Республике Беларусь состоит около 4,5 млн автотранспортных средств, из которых 84 % принадлежат гражданам. Автомобильный транспорт страны выполняет свыше 55 % объемов внутренних грузовых перевозок с тенденцией увеличения этой доли, являясь главным перевозчиком в развивающихся секторах экономики Беларуси. Доля затрат, связанных с производством автомобилей, составляет лишь 2–5 % от затрат за весь жизненный цикл этих автомобилей. Требуемое качество и бесперебойность перевозочного процесса обуславливают важность проблемы подготовки высококвалифицированных специалистов автотранспортного профиля.

Техническая эксплуатация автомобилей (ТЭА) – стадия жизненного цикла, которая включает их хранение, техническое обслуживание (с диагностированием

ем) и ремонт [1]. Обучение по ТЭА направлено на приобретение компетенций (знаний, умений и личностных качеств), необходимых для решения теоретических и практических задач в будущей профессии. Однако компетенции, предложенные образовательным стандартом, должны коррелировать с должностными инструкциями работников предприятий, а лучше – с их реальными служебными функциями.

Анализ учебных планов по специальности «Техническая эксплуатация автомобилей», а также учебников и учебных пособий, изданных на их базе, показывает, что подготовка специалистов автомобильного транспорта вузами и колледжами может быть существенно улучшена за счет изменения состава, названий и содержания дисциплин, связанных с подготовкой этих специалистов. При формировании учебных планов по специальности объем понятия ТЭА как целое должен быть распределен без пропусков и повторений в виде частей в объемах понятий изучаемых дисциплин. Необходимо также учитывать и стадии жизненного цикла автомобилей и предприятий, которые изучаются соответствующими дисциплинами.

В зависимости от вида выполняемых производственных функций автотранспортные предприятия подразделяются на автоэксплуатационные, автообслуживающие и авторемонтные. *Автоэксплуатационные предприятия* выполняют перевозку грузов и пассажиров собственным или арендованным парком автомобилей с его межменным хранением, техническим обслуживанием и текущим ремонтом. *Автообслуживающие предприятия* выполняют услуги, связанные с хранением, диагностированием, техническим обслуживанием, текущим ремонтом, заправкой топливом, маслами, технологическими жидкостями и сжатым воздухом любых автомобилей, как приписанных к данному экономическому региону, так и следующих через него транзитом, как принадлежащих предприятиям, так и отдельным гражданам. *Авторемонтные* предприятия в большинстве случаев специализированы по оказанию услуг, они наиболее оснащенные и выполняют все виды ремонта автомобилей (агрегатов), в том числе капитального, с восстановлением их деталей.

Цель работы заключалась в определении значения и места ТЭА в жизненном цикле не только самих автомобилей, но и производств, в которых они обрабатываются, выяснении – чем будут заниматься будущие специалисты и руководители в подразделениях ТЭА и нацеливании их на предстоящее успешное и эффективное обучение.

Поставленная цель достигается путем системного изложения основ ТЭА, включающего описание совокупности понятий и целостного множества функциональных элементов, находящихся друг с другом в связях и отношениях и объединенных стремлением содержать парк автомобилей в исправном состоянии в течение всего срока их службы с минимальными затратами. Средствами достижения поставленной цели являются изучение процессов старения частей автомобилей и восстановления эксплуатационных свойств, проектирования современного оборудования, применения прогрессивной организации производства, изложение особенностей реконструкции и технического перевооружения частей автотранспортных предприятий с использованием новых научных знаний и передового производственного опыта. Студенты должны быть подготов-

лены к эффективному восприятию специальных дисциплин по ТЭА, а преподаватели – ориентированы к такому их изложению.

Государственный компонент цикла специальных дисциплин по ТЭА [2] включает следующие дисциплины (в порядке упоминания):

- механизация процессов технической эксплуатации;
- экология и ресурсосбережение на автомобильном транспорте;
- охрана труда;
- техническая эксплуатация автомобилей;
- проектирование организаций автомобильного транспорта;
- организация производства и менеджмент на транспорте.

Государственный компонент дополняется дисциплиной – технология производства и ремонта автомобилей, которая входит в компонент учреждения высшего образования.

Объекты изучения специальности следующие: парк используемых автомобилей с изменяющимся их техническим состоянием, обслуживающе-ремонтная база автотранспортных предприятий (исполнители, помещения, средства технологического оснащения, техническая документация) и процессы их взаимодействия.

Предмет изучения составляют следующие функции, свойства и процессы ТЭА [3, 4]: старение автомобилей в виде накопление повреждений в их частях, обуславливающих предстоящие отказы; безразборное определение технического состояния автомобилей (диагностирование) с поиском неисправностей и определением остаточного ресурса; поддержание исправного состояния автомобилей техническим обслуживанием; устранение неисправностей и восстановление ресурса автомобилей ремонтом; надежность автомобилей; организация производства в пространстве и во времени; реконструкция и техническое перевооружение частей автотранспортных предприятий; охрана труда и окружающей среды.

Рассмотрение системы взаимодействующих объектов ТЭА (исполнителей, оборудования и автомобилей), находящихся друг с другом в связях и отношениях и объединенных общей целью, служит обоснованием структуры учебных планов и материала дисциплин. Системное изложение материала придает ему лаконичность, убедительность и доходчивость.

Объекты системы образуют целостное множество элементов, которые функционируют в производственной среде (производственном участке с ресурсными и транспортными коммуникациями), отделенной от них «оболочкой». Между элементами имеются внутренние и внешние связи, как между собой, так и с внешней средой соответственно. Совершенство элементов и связей между ними определяется видами и количеством расходуемых ресурсов (трудовых, материальных и энергетических), поступающих из внешней среды.

Функция системы заключается в воздействии на один из ее элементов – автомобиль. Под влиянием действий исполнителей и оборудования на разных стадиях ТЭА процессы старения автомобилей или тормозятся за счет технического обслуживания с отдалением времени наступления постепенных отказов, или восстанавливается исправное состояние этих автомобилей за счет ремонта с исключением появления внезапных отказов. Ограничения в системном под-

ходе – это условия, которые должны быть выполнены неукоснительно, к ним относятся требования охраны труда и защиты окружающей среды, значения показателей качества услуг и производительности труда.

По количеству элементов система имеет три вида внутренних связей, определяемых парными взаимодействиями. Внутренние связи «исполнители – автомобили» и «оборудование – автомобили» с описанием конечного технического состояния автомобилей определяют технологический процесс, протекающий на производственном участке, а связи «исполнители – оборудование» определяют порядок управления оборудованием. Чем большее количество неживой природы передается по связям «оборудование – автомобили», тем больше экономится живого руда и повышается коэффициент механизации производственных процессов. Внешние связи системы описывают взаимодействия элементов системы с внешней средой. По внешним связям система получает ресурсы для своего функционирования и выдает товарную продукцию (услуги) и отходы. Связи «среда – исполнители» определяют вклад ресурсов в подготовку рабочих необходимой квалификации (начальные затраты) и их заработную плату (текущие затраты). Связи «среда – оборудование» определяют вклад среды в виде ресурсов в оборудование для его функционирования с воздействием на предмет труда. Связи «автомобили – среда» определяют цену товарных услуг и стоимость возвратных отходов (металлолома и отработавших смазочных материалов).

В представленной модели описание действий исполнителей – это описание организации труда во времени, а разработка планировок расположения оборудования и автомобилей на территории производственных участков – это результат организации производства в пространстве. Описание создаваемого оборудования как целого, так и составляющих его частей во взаимодействии между собой – это результат решения конструкторской задачи по проектированию этого оборудования. Описание изменяющегося состояния автомобиля под действием оборудования и исполнителей – разработка технологического процесса. Внутренние связи «исполнители – автомобили» и «исполнители – оборудование» определяют содержание компетенций специалистов.

Функцией цели системы ТЭА «исполнители – оборудование – автомобили») служит разница между стоимостью ресурсов, перемещающимся по входам и выходам системы. Для парка автомобилей, обслуживаемых или ремонтируемых силами автообслуживающих или авторемонтных предприятий функция цели Q стремится к максимуму

$$Q = [C - (Z_{п.р} + Z_{з.п.р} + M + Э + P_o + O + K_o E_{н.о} + K_з E_{н.з} + A)] \rightarrow \max,$$

где C – цена товарных услуг; $Z_{п.р}$ и $Z_{з.п.р}$ – затраты на подготовку и заработную плату рабочих; M и $Э$ – затраты на материалы и энергию; P_o – затраты на поддержание и восстановление ресурса оборудования; O – стоимость обезвреживания отходов; K_o и $K_з$ – капиталовложения в оборудование и здания; $E_{н.о}$ и $E_{н.з}$ – нормативные коэффициенты эффективности капиталовложений в оборудование и здания; A – затраты на амортизацию.

Для содержания парка автомобилей в исправном состоянии в течение всего срока их службы силами автоэксплуатационного предприятия (в котором не оказывают товарные услуги) функция цели стремится к минимуму

$$Q = (Z_{п.р} + Z_{з.п.р} + M + Э + P_o + O + K_o E_{н.о} + K_з E_{н.з} + A) \rightarrow \min.$$

Таким образом, с учетом приведенных сведений, требуется корректирование названия и содержания ряда дисциплин. Функции ТЭА должны быть описаны один раз даже в рамках различных дисциплин. Дисциплина «Техническая эксплуатация автомобилей» не может оставаться с таким названием, которое полностью повторяет название специальности. Кроме того, эта дисциплина, удовлетворяя потребностям эксплуатационных и обслуживающих предприятий, должна включать изложение надежности автомобилей, их диагностирования, технического обслуживания всех видов и текущего ремонта. Остальные виды ремонта, выполняемого на специализированных ремонтных предприятиях, это предмет дисциплины «Ремонт автомобилей» с подробным описанием процессов восстановления деталей, которые являются основой среднего и капитального ремонта автомобилей. Доля трудоемкости текущего ремонта составляет половину трудоемкости содержания парка этих автомобилей в исправном состоянии. Проектирование средств технологического оснащения (оборудования, приспособлений и инструментов), главным образом, тех, которые невозможно приобрести, а приходится изготавливать в собственном вспомогательном производстве, необходимо излагать в соответствующей дисциплине. Ввиду того что на предприятиях автомобильного транспорта не проектируют предприятия в целом (это предмет деятельности проектных институтов), дисциплина «Проектирование предприятий автомобильного транспорта» должна быть ориентирована на изучение вопросов реконструкции и технического перевооружения отдельных производственных участков – именно на то, чем реально занимаются специалисты на предприятиях. Полезно в качестве дисциплины вузовского компонента в учебные планы включить дисциплину «Триботехника». Содержания остальных дисциплин с небольшим уточнением названий должны более полно отражать потребности автотранспортных предприятий.

Заключение

С позиций системного подхода обоснованы меры по совершенствованию цикла учебных дисциплин (формирующих служебные компетенции), по которым готовят студентов по специальности «Техническая эксплуатация автомобилей». Предложено упорядочение ряда дисциплин, уточнение их названий и направленность содержания.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Система разработки и постановки продукции на производство. Термины и определения: Р50-605-80-93. – М. : Всероссийский научно-исследовательский институт стандартизации Госстандарта России, 1993. – 79 с.
2. Образовательный стандарт высшего образования. Высшее образование. Первая ступень. Специальность 1-37 01 06 Техническая эксплуатация автомобилей (по направлениям). Направление специальности 1-37 01 06-01 Техническая эксплуатация автомобилей (автотранспорт общего и личного пользования). – Минск: Министерство образования Республики Беларусь, 2020. – 15 с.
3. Положение о техническом обслуживании и ремонте подвижного состава автомобильного транспорта / М-во автом. транс. РСФСР. – М.: Транспорт, 1986. – 73 с.
4. Техническое обслуживание и ремонт автомобильных транспортных средств. Нормы и правила проведения: ТКП 248-2010 (02190). – Минск : РУП

УДК 621. 81: 621 – 192

ТРАНСМИССИИ КОЛЕСНЫХ ПОГРУЗЧИКОВ С ГИДРОСТАТИЧЕСКИМ ПРИВОДОМ

Капуста П. П.¹, Полещук С. В.^{2,3}

*1) Белорусский национальный технический университет,
г. Минск, Республика Беларусь*

2) ООО «АМКОДОР», г. Минск, Республика Беларусь

3) ООО «ИнтерСервсоюз» – управляющий компанией Группы ФИД

В последние годы использование электронного управления гидростатическим приводом в сочетании с применением специализированных коробок передач позволило добиться больших успехов в плане обеспечения функциональности и экономичности трансмиссии колесных погрузчиков. Разработан непрерывно регулируемый привод, использование которого очень хорошо отвечает требованиям, предъявляемым к трансмиссиям колесных погрузчиков.

Выбор типа трансмиссии

Трансмиссия колесных погрузчиков должна обеспечивать:

– максимальную силу тяги при минимальной скорости движения при наборе материала для загрузки ковша;

– частое реверсирование при выполнении рабочего цикла: при длительности рабочего цикла ~ 25–45 с колесный погрузчик изменяет направление движения четыре раза. Из-за возвратно поступательного движения колесный погрузчик практически никогда не бывает неподвижным 4;

– оптимальное распределение мощности: при выполнении рабочего цикла колесным погрузчиком его тяга и скорость контролируется водителем за счет изменения частоты вращения коленчатого вала двигателя. При этом необходимо обеспечить работу двигателя в режиме минимального расхода топлива.

В настоящее время колесные погрузчики комплектуются одним из двух типов трансмиссии: гидродинамической либо гидростатической.

В погрузчиках с гидродинамической трансмиссией между двигателем и коробкой передач устанавливается гидротрансформатор. Его функциональная особенность в том, что чем более мощный крутящий момент нужен на выходе из гидротрансформатора, тем более высокие обороты двигателя требуются на входе.

Это означает, что для обеспечения максимальной силы тяги или максимальных усилий, создаваемых рабочим оборудованием погрузчика, оператор должен разгонять двигатель до максимальной частоты вращения, т. е. работать в режиме максимального расхода топлива.

В погрузчиках с гидростатической трансмиссией двигатель приводит в движение гидронасос, который преобразует крутящий момент в поток масла под

высоким давлением (до 320...420 бар). От гидронасоса поток масла подается напрямую на гидромотор, откуда тот возвращается обратно в гидронасос. Замкнутый поток обеспечивает вращение гидромотора, который непосредственно передает вращение на коробку передач. Чем больший крутящий момент должен создать гидромотор, тем более мощный крутящий момент требуется для привода гидронасоса. Как известно максимальный крутящий момент дизельных двигателей развивается в диапазоне 1400...1600 мин⁻¹.

Это означает, что для обеспечения максимальной силы тяги или максимальных усилий, создаваемых рабочим оборудованием погрузчика, оператор разгоняет дизельный двигатель лишь до средних оборотов, т. е. постоянно работать в режиме минимального расхода топлива.

На рисунке 1 приведены кривые изменения мощности P , крутящего момента T и расхода топлива b_e в зависимости от изменения оборотов дизельного двигателя для колесного погрузчика, оборудованного гидродинамической и гидростатической трансмиссией.

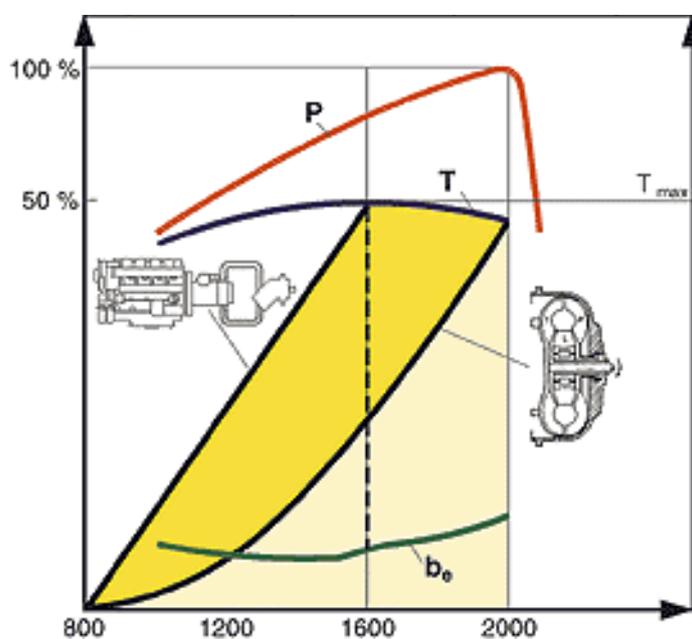


Рисунок 1 – Кривые изменения мощности P , крутящего момента T и расхода топлива b_e в зависимости от изменения оборотов дизельного двигателя для колесного погрузчика, оборудованного гидродинамической и гидростатической трансмиссией

Система управления трансмиссией колесного погрузчика должна обеспечить предотвращение пробуксовки колес и обеспечить максимально возможную силу тяги.

Согласно исследованиям, когда колеса вращаются с 30 %-ной пробуксовкой, т. е. когда скорость вращения колес в 1,3 раза превышает скорость движения машины, реализуется максимальное тяговое усилие. Гидростатическая трансмиссия с электронным управлением позволяет оптимально реализовать этот режим.

Обеспечить реализацию этого режима при использовании гидродинамической трансмиссии значительно сложнее, так как необходимо обеспечить управ-

ление величиной рабочего давления в гидротрансформаторе в зависимости от момента сопротивления внешней нагрузке, а также тягового усилия погрузчика. При этом изменение тягового усилия погрузчика производится за счет воздействия на его тормозную систему независимо от частоты вращения коленчатого вала двигателя.

Анализ результатов сравнительных испытаний двухколесных погрузчиков, один из которых оборудован гидродинамической, а второй гидростатической трансмиссией показывает, что гидростатическая трансмиссия хорошо показывает себя при работе погрузчика на коротком плече, а гидромеханическая – при работе на длинных перегонах и при движении в гору.

Таким образом, к преимуществам гидростатических трансмиссий стоит отнести:

- возможность обеспечения точного и плавного регулирования параметров работы техники (вращения рабочих органов и перемещения);
- возможность изменить направление движения, не останавливая ход;
- возможность использования всей мощности двигателя (даже на малой скорости);
- значительное снижение расхода топлива;
- обеспечение максимального комфорта при движении.

Основными недостатками, препятствующими более широкому распространению гидростатической трансмиссии, являются: более низкий КПД по сравнению с гидромеханической трансмиссией и в целом достаточно высокая стоимость гидроаппаратов.

Конструкция гидростатической трансмиссии

В зависимости от требуемой скорости и тягового усилия колесного погрузчика, а также от мощности его двигателя, гидростатическую трансмиссию необходимо дополнять коробкой передач. Эта необходимость обусловлена тем, что в закрытых гидросистемах применяются аксиально-поршневые регулируемые гидронасосы и гидромоторы, а диапазон изменения крутящего момента в гидростатической трансмиссии ограничен предельными скоростями вращения насоса и мотора, а также величиной объемной подачи рабочей жидкости, зависящей в свою очередь от величины хода плунжеров, т. е. от угла наклона шайбы.

Для колесных погрузчиков, оборудованных дизельными двигателями мощностью до 75 кВт, кинематическая схема гидростатической трансмиссии приведена на рисунке 2.

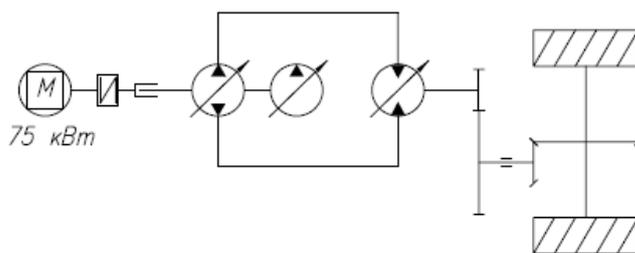


Рисунок 2 – Кинематическая схема гидростатической трансмиссии колесных погрузчиков, оборудованных дизельными двигателями мощностью до 75 кВт

Выходной крутящий момент регулируемого гидромотора подается на входной вал заднего моста посредством цилиндрической зубчатой передачи. Для увеличения вращающего момента, подводимого к ведущим колесам, задний мост оборудован бортовыми планетарными редукторами. Для повышения проходимости задний мост оборудован самоблокирующимся дифференциалом. Рабочий тормоз выполнен в виде сухого тормозного диска, установленного на входном валу переднего моста.

Для колесных погрузчиков, оборудованных дизельными двигателями 100–150 кВт, существует два варианта конструкции гидростатической трансмиссии:

– гидростатическая трансмиссия с двухступенчатой планетарной коробкой передач;

– гидростатическая трансмиссия без коробки передач. В данной трансмиссии требования по обеспечению более высокого тягового усилия погрузчика обеспечиваются за счет установки двух параллельно подключенных в гидравлическую систему гидромоторов, крутящий момент с которых подается на входной вал заднего моста посредством двух отдельных цилиндрических зубчатых передач.

Кинематическая схема гидростатической трансмиссии с двухступенчатой планетарной коробкой передач приведена на рисунке 3.

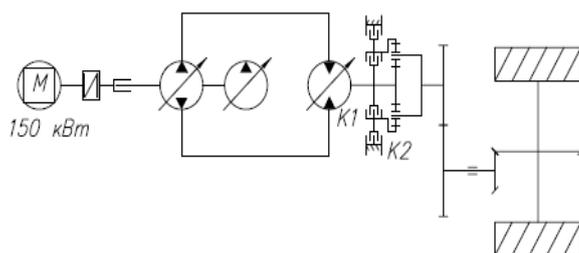


Рисунок 3 – Кинематическая схема гидростатической трансмиссии с двухступенчатой планетарной коробкой передач

Фрикционные муфты K1 и K2 служат для включения передач. Переключение передачи происходит в течение короткого промежутка времени и сопровождается незначительным снижением крутящего момента. Включенная передача и крутящий момент гидромотора синхронизируются посредством системы электронного управления гидростатическим приводом.

Кинематическая схема гидростатической трансмиссии с двумя гидромоторами приведена на рисунке 4.

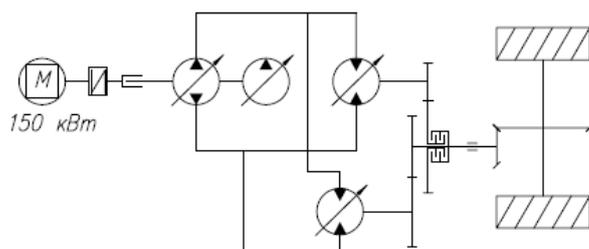


Рисунок 4 – Кинематическая схема гидростатической трансмиссии с двумя гидромоторами

Гидростатическая трансмиссия с двумя гидромоторами имеет ряд преимуществ по сравнению с гидростатической трансмиссией с одним большим гидромотором. К ним относятся:

– возможность получения более высокого крутящего момента – используя гидромоторы меньшего объема;

– возможность перевода регулирующей шайбы одного из двигателей в нулевое положение и механического отключения его за счет размыкания фрикционной муфты при движении погрузчика на высоких скоростях. Это позволяет повысить топливную экономичность погрузчика.

Рабочий тормоз при использовании таких кинематических схем выполнен в виде многодискового сцепления в масляной ванне расположенного на обоих мостах погрузчика.

Для колесных погрузчиков, оборудованных дизельными двигателями от 200 кВт и более, гидростатическую трансмиссию требуется обязательно дополнить 3-ступенчатой планетарной коробкой передач. Это обусловлено необходимостью обеспечить более высокое тяговое усилие и максимальную скорость не менее 40 км/ч погрузчика. Кинематическая схема такой гидростатической трансмиссии приведена на рисунке 5.

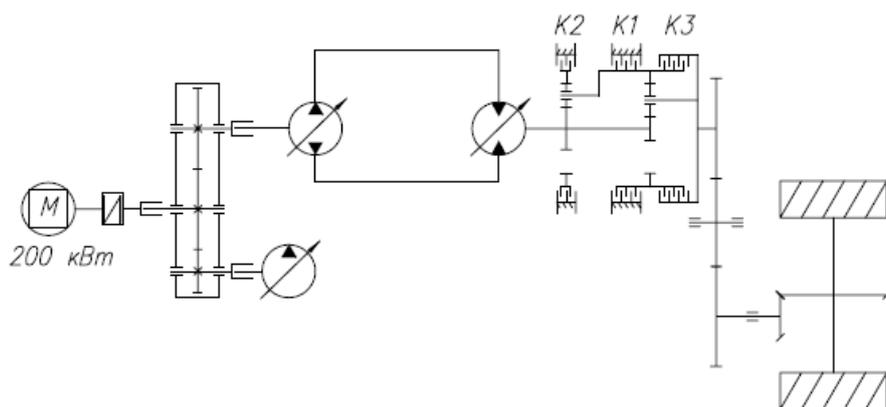


Рисунок 5 – Кинематическая схема гидростатической трансмиссии с 3-ступенчатой планетарной коробкой передач

Фрикционные муфты К1, К2 и К3 служат для включения передач. Переключение передачи происходит в течение короткого промежутка времени и сопровождается незначительным снижением крутящего момента. Включенная передача и крутящий момент гидромотора синхронизируются посредством системы электронного управления гидростатическим приводом.

При реализации кинематических схем (рисунки 1–4) гидромотор с приводом жестко установлен на заднем мосту. В случае реализации кинематической схемы, приведенной на рисунке 5, гидромотор с 3-ступенчатой планетарной коробкой передач монтируется на задней полураме погрузчика и соединен с передним и задним мостами посредством карданных валов.

Дальнейшим развитием систем гидростатического привода для колесных погрузчиков является гидростатическая трансмиссия кинематическая схема, которая, приведена на рисунке 6.

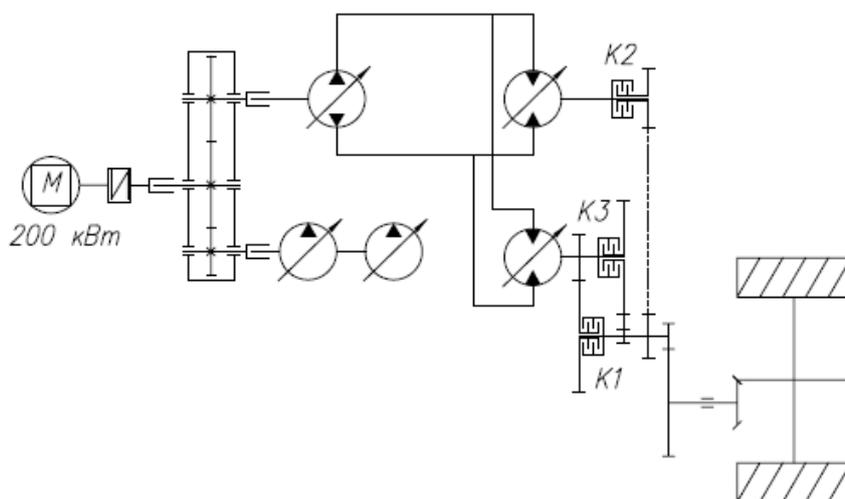


Рисунок 6 – Кинематическая схема гидростатической трансмиссии с 3-ступенчатой коробкой передач и двумя гидромоторами

В данной конструкции крутящий момент передается в коробку передач двумя параллельно подключенными в гидравлическую систему гидромоторами.

На первой передаче фрикционные муфты K1 и K2 включены и крутящий момент передается в коробку передач гидромоторами 1 и 2. На второй передаче включена фрикционная муфта K2 и крутящий момент передается в коробку передач гидромотором 2. При этом регулирующая шайба гидромотора 1 переведена в нулевое положение, и он механически отключён его за счет размыкания фрикционной муфты. На третьей передаче включена фрикционная муфта K3 и крутящий момент передается в коробку передач гидромотором 1. При этом регулирующая шайба гидромотора 2 переведена в нулевое положение, и он механически отключён его за счет размыкания фрикционной муфты.

Работа такой гидростатической трансмиссии аналогична работе роботизированной коробки передач с двумя сцеплениями, применяемой в настоящее время на грузовых и легковых автомобилях.

Гидростатическая трансмиссия с 3-ступенчатой коробкой передач и двумя гидромоторами имеет ряд преимуществ по сравнению с гидростатической трансмиссией с 3-ступенчатой планетарной коробкой передач. К ним относятся:

- более простая конструкция редукторной части коробки передач;
- возможность получения более высокого крутящего момента, используя гидромоторы меньшего объема;
- возможность перевода регулирующей шайбы одного из двигателей в нулевое положение и механического отключения его за счет размыкания фрикционной муфты при движении погрузчика на высоких скоростях. Это позволяет повысить топливную экономичность погрузчика;
- возможность оптимизировать процесс переключения передач за счет сокращения времени переключения передачи и уменьшением потерь крутящего момента.

Для сравнения на рисунке 7 показана кинематическая схема трансмиссии колесного погрузчика с гидродинамической трансмиссией типа ZF Ergopower 4WG.

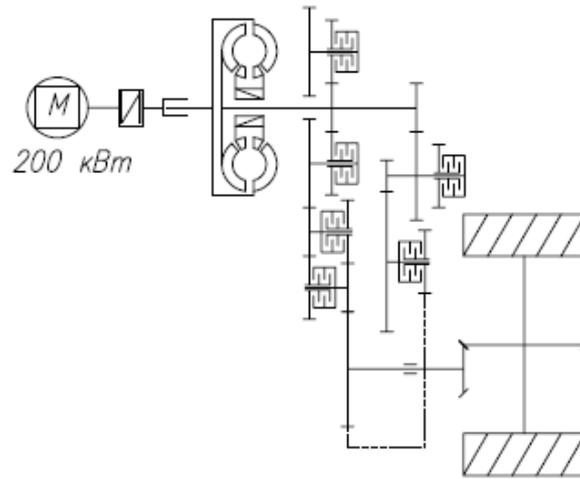


Рисунок 6 – Кинематическая схема гидродинамической трансмиссии с 4-х ступенчатой коробкой передач

Анализ рисунка показывает, что для обеспечения реализации требований по тяговому усилию и максимальной скорости движения погрузчика применяемая гидродинамическая трансмиссия имеет более сложную редукторную часть коробки передач и оборудована большим числом фрикционных муфт.

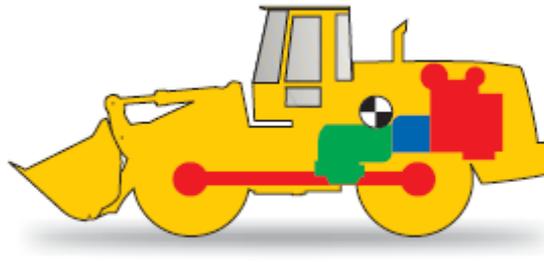
Заключение

Все вышеизложенное позволяет однозначно сделать вывод о том, что для использования в конструкции колесного погрузчика гидростатическая трансмиссия более предпочтительна по сравнению с гидродинамической. Кроме очевидных преимуществ, таких как:

- возможность реверсирования без применения дополнительной механической передачи;
- возможность реализации максимального тягового усилия в стоп-режиме с очень высокой эффективностью;
- ограничение максимального крутящего момента путем ограничения высокого давления;
- возможность реализации концепции двойного двигателя.

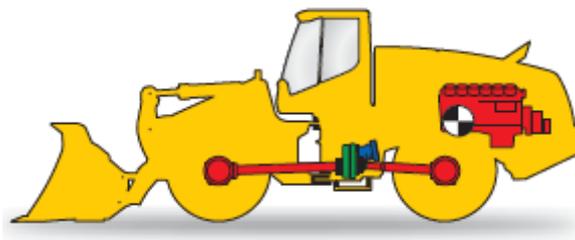
Гидростатическая трансмиссия позволяет обеспечить принцип модульной компоновки агрегатов погрузчика.

Компоновка агрегатов погрузчика, оборудованного гидродинамической трансмиссией, такова, что на «корме» располагается радиатор с вентилятором, далее, ближе к центру погрузчика, размещается двигатель, к маховику которого крепится гидротрансформатор, а к нему, в свою очередь, крепится коробка передач. Все эти агрегаты соединены между собой механически, что исключает вариации в компоновке этих агрегатов. Коробка передач находится в центре погрузчика. Как следствие, все указанные агрегаты размещены ближе к геометрическому центру погрузчика, в результате чего центр тяжести также находится близко к нему. Для увеличения грузоподъемности ковша такого погрузчика необходимо установить на «корме» дополнительный балласт, при этом центр тяжести все равно находится между геометрическим центром и задней осью погрузчика (рисунок 7).



*Рисунок 7 – Компоновочная схема погрузчика
оборудованного гидродинамической трансмиссией*

На погрузчике с гидростатической трансмиссией, за счет отсутствия механической связи между двигателем и трансмиссией, есть возможность модульно варьировать компоновку агрегатов, например, развернуть дизельный двигатель в сборе с гидронасосами и радиатором на 180° , сместив тем самым радиатор, как более легкий агрегат, к центру погрузчика, а дизельный двигатель с гидронасосами, как более тяжелые элементы, – назад, к «корме» погрузчика. Это смещает центр тяжести погрузчика назад и вниз, увеличивая его грузоподъемность на ковше и устойчивость на пересеченной местности без возрастания общей массы самого погрузчика (рисунок 8).



*Рисунок 8 – Компоновочная схема погрузчика
оборудованного гидростатической трансмиссией*

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Hydrostatik Transmission / From: Biermanns Handbook of Pulp and Paper (Third Edition), 2018.
2. Альгин, В. Б. Ресурсная механика трансмиссий мобильных машин / В. Б. Альгин, С. Н. Поддубко. – Минск : Беларуская навука, 2019. – 549 с.
3. Альгин, В. Б. Динамика, надежность и ресурсное проектирование трансмиссий мобильных машин / В. Б. Альгин. – Минск : Навука и тэхніка, 1995. – 256 с.
4. Альгин, В. Б. Высокомощные гидромеханические передачи: патентно-информационное и расчетное исследование. Часть 1. Методика / В. Б. Альгин, Е. Н. Боковец, Е. В. Кузнецов // Механика машин, механизмов и материалов: международный научно-технический журнал. – 2015. – № 2. – С. 5–14.
5. Прочностная доводка гидромеханических коробок передач в условиях стендовых испытаний / А. Т. Скойбеда [и др.] // Международный научно-

УДК 621.113

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ НЕИСПРАВНОСТЕЙ БЕНЗИНОВОГО ДВИГАТЕЛЯ С РАСПРЕДЕЛЁННЫМ ВПРЫСКОМ ПО КОРРЕКЦИИ КОЭФФИЦИЕНТА ИЗБЫТКА ВОЗДУХА

Кострицкий В. В.

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

Введение

Благодаря совершенствованию электронных систем управления двигателя получили большую мощность и крутящий момент при неизменной конструкции и геометрических размерах кривошипно-шатунного и газораспределительного механизма. На всех режимах работы двигателя значительно снизился расход топлива за счет возможности точного дозирования и своевременной подачи к месту воспламенения топлива и воздуха. Кроме того, электронная система управления двигателем (ЭСУД) позволяет автомобильному транспорту становиться все более экологичным. За последние годы концентрация таких токсичных веществ как CO, CH и NO_x в отработавших газах автомобиля снизилась в несколько раз [1].

Однако одновременное получение максимальных мощностных, экономических и экологических показателей невозможно, так как они являются противоречащими друг другу. Достижение цели управления возможно только на основе компромисса. ЭСУД современного ДВС стремится обеспечить максимально безопасную работу двигателя, при приемлемых мощности и топливной экономичности. Основное назначение ЭСУД при этом состоит в обеспечении оптимального состава рабочей смеси в цилиндрах двигателя внутреннего сгорания (ДВС) и воспламенение её в определенный момент времени [2].

В Республики Беларусь около 70 % всех легковых автомобилей являются автомобилями с бензиновым двигателем. Это связано с тем, что на протяжении последних 8 лет наиболее популярные марки автомобилей были представлены моделями в основном с бензиновыми двигателями. К этим моделям можно отнести: Volkswagen Polo, Lada Vesta, Lada Granta, Lada Largus, Renault Logan, Renault Logan Stepway, Renault Sandero Stepway, Renault Kaptur, Renault Duster, Kia Rio, Hyundai Solaris, а также автомобили белорусского производства: Geely Atlas, Geely Emgrant, Geely Coolray. Причем модельный ряд представлен 23-мя бензиновыми двигателями и только 4 из них имеют систему непосредственного впрыска. На всех остальных используется система с распределенным впрыском Multi Point Injection (MPI). Поэтому разработка метода по определению неисправностей бензинового двигателя и электронной системы управления с распределённым впрыском является актуальной задачей.

Основная часть

С точки зрения обеспечения технических, экономических и экологических требований бензиновые двигатели с распределенным и непосредственным впрыском имеют совершенно разные подходы. Отсюда следует, что способы приготовления топливовоздушной смеси отличаются, а также используются для этого разные системы. Поэтому и подходы в обеспечении исправного технического состояния этих систем будут разные.

Одним из подходов по определению технического состояния ЭСУД и ДВС является метод оценки состава рабочей смеси по коэффициенту избытка воздуха λ . Согласно этому методу топливовоздушная смесь может находиться в одном из трех состояний.

В первом состоянии реальное количество воздуха совпадает с теоретическим необходимым и называется стехиометрическими. В этом случае $\lambda = 1$. Во втором состоянии количество воздуха больше необходимого, при этом смесь принято называть бедной, и коэффициент находится в диапазоне $\lambda = 1,0...1,3$. Третье состояние возникает, когда воздуха меньше необходимого, а смесь называют богатой. Такая смесь характеризуется значением $\lambda = 0,8...1,0$.

Чтобы определить закономерности влияния изменения технического состояния элементов ЭСУД и двигателя на состава смеси, необходимо рассмотреть процессы, происходящие в цилиндре двигателя.

На такте выпуска на закрытый впускной клапан происходит впрыск топлива во впускной коллектор. Впрыск топлива можно охарактеризовать *длительностью впрыска топлива* ($t_{ен}$). За оставшийся угол поворота коленчатого вала на такте выпуска топливо испаряется, перемешивается с воздухом, и топливовоздушная смесь начинает через открывающуюся впускной клапан попадать в цилиндр.

На такте сжатия за некоторый угол от верхней мертвой точки (ВМТ) происходит искрообразование. Этот угол называется *углом опережения зажигания* (УОЗ) $\delta_{оз}$. Затем происходит накопление энергии в следствии чего в момент закрытия транзистора происходит быстрое увеличение напряжения за счет самоиндукции. Всплеск напряжения и приводит к искрообразованию. В результате происходит воспламенение рабочей смеси, что приводит к максимальному давлению на такте рабочего хода. Затем на такте рабочего хода скорость вращения коленчатого вала достигает максимального значения.

Все описанные процессы должны проходить строго по порядку согласно частоте вращения и углу положения коленчатого вала. Поэтому значение таких параметров, как угол опережения зажигания $\delta_{оз}$ и длительность впрыска топлива $t_{ен}$, являются основополагающими параметрами ЭСУД. Соответственно эти же параметры являются важными диагностическими параметрами для определения состояния двигателя и ЭСУД.

Длительность впрыска будет зависеть от частоты вращения, нагрузки на двигатель, температуры охлаждающей жидкости и напряжения бортовой сети автомобиля.

$$t_{вп} = f(N, M, t^{\circ}, U_{бс}), \quad (1)$$

где N – частота вращения коленчатого вала, об/мин; M – нагрузка на двигатель, кг или МПа; t° – температура охлаждающей жидкости, °С; $U_{бс}$ – напряжение бортовой сети, В.

Угол опережения зажигания (УОЗ) $\delta_{\text{оз}}$ есть функция от оборотов коленчатого вала, нагрузки на двигатель, температуры охлаждающей жидкости:

$$\delta_{\text{оз}} = f(N, M, t^\circ). \quad (2)$$

Для определения нагрузки в двигателях с распределенным впрыском существует два способа:

Способ 1. Определения нагрузки по датчику абсолютного давления во впускном коллекторе:

$$M = f(P_{\text{дв}}, t_{\text{ТВ}}, N, V_{\text{вп}}), \quad (3)$$

где $P_{\text{дв}}$ – давление воздуха во впускном коллекторе, МПа; $t_{\text{ТВ}}$ – температура воздуха на впуске, °С; N – обороты коленчатого вала, об/мин; $V_{\text{вп}}$ – объем впускного коллектора, м³.

Давление и температура воздуха, обороты и сечения впускного коллектора дают полное представление о том, какое количество воздуха попадает в цилиндр.

Способ 2. Этот способ представляет из себя прямое измерение массы воздуха. Для этого используется датчик массового расхода воздуха:

$$M = f(m_{\text{в}}, N), \quad (4)$$

где $m_{\text{в}}$ – масса воздуха, попавшая в цилиндр за цикл работы этого цилиндра, кг/цикл.

Каждому значению массы воздуха в такой системе должно соответствовать определенное давление во впускном коллекторе.

ЭСУД должна обеспечивать управление двигателем. Бензиновый двигатель управляется изменением нагрузки. Изменение нагрузки обеспечивается изменением сечения (пропускной способности) впускного коллектора. В системах МРІ для этого используется дроссельный узел с электронной дроссельной заслонкой. В зависимости от соотношения частоты вращения коленчатого вала, положения педали акселератора, нагрузки на двигатель и температуры охлаждающей жидкости ЭСУД определяет *угол открытия дроссельной заслонки* (УОДЗ) $\alpha_{\text{дз}}$ и производит идентификацию режимов работы двигателя:

$$\alpha_{\text{дз}} = f(N, M, t^\circ, U_{\text{бс}}), \quad (5)$$

где $\alpha_{\text{дз}}$ – действительный угол открытия дроссельной заслонки.

Для контроля состава смеси используется сигнал с датчика концентрации кислорода (λ -зонда). Этот сигнал получил название обратной связи системы управления. Другими словами, контроль за качеством состава топливовоздушной смеси осуществляется по содержанию кислорода в отработавших газах K_{O_2} .

Если состав смеси не соответствует стехиометрии, то ЭБУ вносит коррективы в работу системы подачи топлива и воздуха. При этом происходит изменение либо длительности впрыска, либо изменение степени открытия дроссельной заслонки. Этот процесс назовем *коррекцией λ -регулирувания*.

Коррекция λ -регулирувания – это параметр, который указывает на степень отклонения смеси от стехиометрического состава:

$$ST = \frac{\lambda_{\text{дт}}}{\lambda_{\text{стт}}} \cdot 100 \%, \quad (6)$$

где ST – λ -регулирувание, %; $\lambda_{\text{стт}}$ – коэффициент стехиометрического состава смеси; $\lambda_{\text{дт}}$ – коэффициент действительного текущего состава смеси.

В литературе довольно часто можно встретить обозначения коррекции λ -регулирувания буквами ST, т. к. в англоязычной литературе называется short term, то есть краткосрочная по времени.

Параллельно λ -регулируванию протекает ещё один процесс – λ -адаптации. λ -адаптация рассчитывается на основе λ -регулирувания и изменяется относительно медленно. λ -адаптация подвергается коррекции в случае, если λ -регулируванию выходит за допустимый диапазон.

Целью λ -адаптации является компенсация влияния на состав топливовоздушной смеси разброса характеристик ЭСУД, допусков при изготовлении ДВС, а также в результате отклонений параметров ДВС и элементов ЭСУД, возникающих при эксплуатации. *Коррекция λ -адаптации* – результат адаптации ЭСУД к фактическому состоянию ДВС.

$$LT = \frac{\lambda_{да}}{\lambda_{ст}} \cdot 100 \%, \quad (7)$$

где LT – λ -адаптация, %; $\lambda_{ст}$ – коэффициент стехиометрического состава смеси; $\lambda_{да}$ – коэффициент действительного адаптированного состава смеси.

Коррекция λ -адаптации обозначается буквами LT, т. к. в англоязычной литературе называется long term, то есть долгосрочная по времени.

λ -регулирувание и λ -адаптация зависят от концентрации кислорода в отработавших газах:

$$\begin{cases} ST = f(K_{O_2}) \\ LT = f(K_{O_2}), \end{cases} \quad (8)$$

где K_{O_2} – содержание кислорода в отработавших газах, %.

λ -регулирувание обнуляется при каждом выключении зажигания. λ -адаптация хранится в памяти ЭБУ до отключения электропитания. Полученные значения коррекций λ -адаптации учитываются при расчете длительности управляющих форсунками импульсов и при работе ЭСУД в режиме разомкнутого цикла.

Описанные механизмы λ -регулирувания и λ -адаптации справедливы как для систем с узкополосным датчиком концентрации кислорода, так и для систем с широкополосным λ -зондом.

Таким образом, расчетная длительность впрыска и расчетный угол открытия дроссельной заслонки будут отличаться от действительных значений этих параметров. *Действительная длительность впрыска $t_{впд}$* будет определяться зависимостью:

$$t_{впд} = f(N, M, t^\circ, U_{бс}, K_{O_2}) \quad (9)$$

А *действительный угол открытия дроссельной заслонки $\alpha_{дзд}$* характеризуется следующей зависимостью:

$$\alpha_{дзд} = f(N, M, t^\circ, U_{бс}, K_{O_2}). \quad (10)$$

Полученные зависимости (2), (8), (9) и (10) описывают в полной мере основные функции ЭСУД для обеспечения смеси стехиометрического состава. Эти зависимости можно представить в виде системы:

$$\begin{cases} t_{\text{ВПД}} = f(N, M, t^\circ, U_{\text{бс}}, K_{O_2}) \\ \delta_{O_3} = f(N, M, t^\circ,) \\ \alpha_{\text{ДЗД}} = f(N, M, t^\circ, U_{\text{бс}}, K_{O_2}) \\ ST = f(K_{O_2}) \\ LT = f(K_{O_2}). \end{cases} \quad (11)$$

В зависимости от способа нагрузки на двигатель, с учетом формул (3) и (4), система может принять следующие формы:

При способе 1:

$$\begin{cases} t_{\text{ВПД}} = f(N, P_{\text{ДВ}}, t_{\text{ТВ}}, t^\circ, U_{\text{бс}}, K_{O_2}) \\ \delta_{O_3} = f(N, P_{\text{ДВ}}, t_{\text{ТВ}}, t^\circ) \\ \alpha_{\text{ДЗД}} = f(N, P_{\text{ДВ}}, t_{\text{ТВ}}, t^\circ, U_{\text{бс}}, K_{O_2}) \\ ST = f(K_{O_2}) \\ LT = f(K_{O_2}). \end{cases} \quad (12)$$

При способе 2:

$$\begin{cases} t_{\text{ВПД}} = f(N, m_{\text{ВЗ}}, t_{\text{ВЗ}}, t^\circ, U_{\text{бс}}, K_{O_2}) \\ \delta_{O_3} = f(N, m_{\text{В}}, t_{\text{ВЗ}}, t^\circ) \\ \alpha_{\text{ДЗД}} = f(N, m_{\text{В}}, t_{\text{ТВ}}, t^\circ, U_{\text{бс}}, K_{O_2}) \\ ST = f(K_{O_2}) \\ LT = f(K_{O_2}). \end{cases} \quad (13)$$

Таким образом, метод определения неисправностей бензинового двигателя с распределённым впрыском по коррекции коэффициента избытка воздуха заключается в следующем:

1. По значениям параметров обратной связи LT и ST определить состояние, в котором находится топливовоздушная смесь.
2. Определить значение параметров правой части зависимостей.
3. Определить значение параметров левой части зависимостей.

Каждому состоянию системы соответствует определенное сочетание параметров левой и правой части полученных зависимостей. Состояние системы «богатая смесь», «бедная смесь» указывают на присутствие неисправности ЭСУД или ДВС. При этом неисправные элементы ЭСУД и ДВС влияют на значения параметров полученных зависимостей. Значение параметров для каждой конкретной неисправности принимают характерное только для этой неисправности сочетание.

Стехиометрическая смесь. Если коррекция λ -адаптации $LT = 0$, то система работает по расчетной значением таких параметров, как длительность впрыска, угол опережения зажигания и угол открытия дроссельной заслонки. При этом коррекция λ -регулирования изменяется от -5 % до +5 % обеспечивая переключение λ -зонда для удержания стехиометрического состава смеси ($\lambda = 1$).

Бедная смесь. Если значение коррекции λ -регулирования превышает +5 %, то текущее отклонение состав смеси соответствует бедной топливовоздушной смеси ($\lambda > 1$), которая не требует адаптации. При этом, если ST превышает до-

пустимый предел, т. е. имеет значение выше +25 %, то происходит коррекция по параметру λ -адаптации. λ -адаптации так же имеет предел +25 %. Превышение этого предела указывает на то, что система не способна скорректировать топливовоздушную смесь до стехиометрического состава. В этом случае фиксируется ошибка P0171 «слишком бедная топливовоздушная смесь».

Причинами бедной смеси могут быть следующие неисправности: неверные показания расходомера воздуха, неверные показания датчика температуры охлаждающей жидкости, неверные показания датчика концентрации кислорода, низкое давление топлива, недостаточный баланс производительности форсунок, негерметичность впускного коллектора, неисправность системы изменения фаз газораспределения, неисправность системы продувки адсорбера, неисправность системы рециркуляции отработавших газов.

Богатая смесь. Если значение коррекции λ -регулирования ниже -5 %, то это означает, что в настоящий момент топливовоздушная смесь богатая ($\lambda < 1$), но не требует адаптации. При этом если ST превышает допустимый предел т. е. имеет значение ниже -25 %, то происходит коррекция по параметру λ -адаптации. λ -адаптации в этом случае имеет предел -25 %. Превышение этого предела указывает на то, что система не способна скорректировать топливовоздушную смесь до стехиометрического состава. В этом случае фиксируется ошибка P0172 «слишком богатая топливовоздушная смесь».

Причинами богатой смеси могут быть следующие неисправности: неверные показания расходомера воздуха, неверные показания датчика температуры охлаждающей жидкости, неверные показания датчика концентрации кислорода, высокое давление топлива, увеличенные показатели баланса производительности форсунок, негерметичный клапан продувки адсорбера.

Заключение

Такие параметры, как длительность впрыска, угол опережения зажигания, угол открытия дроссельной заслонки, λ -регулирование, λ -адаптация, давление во впускном коллекторе, количество воздуха, температура охлаждающей жидкости, температура воздуха на впуске и частота вращения коленчатого вала – как правило отображаются любым диагностическим сканирующим устройством в потоке данных (фактических параметрах). Если в потоке данных выбранной ЭСУД эти параметры отсутствуют, то можно воспользоваться протоколами OBD. Данный метод значительно повышает эффективность диагностирования ЭСУД и ДВС путем сокращения трудоёмкости контрольно-диагностических операций и снижает затраты на обнаружение, локализацию и устранение возникших в ЭСУД неисправностей. В дальнейшем метод определения неисправностей по коррекции коэффициента избытка воздуха может использоваться для организации ведомого диагностирования в автосервисах.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Павленко, Е. А. Анализ методов и средств диагностирования автомобильного транспорта / Е. А. Павленко // Матер. Межд. научн. конф. «Проблемы и перспективы развития Евроазиатских транспортных систем». – Челябинск : ЮУрГУ, 2019. – С. 121–124.

2. Баженов, Ю. В. Поддержание надежности электронных систем управления двигателем в эксплуатации / Ю. В. Баженов, В. П. Каленов // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2016. – № 2. – С. 4–7.

ОПТИМИЗАЦИЯ СТРУКТУРЫ ПОДРАЗДЕЛЕНИЙ ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ ОБСЛУЖИВАНИЮ АВТОМОБИЛЕЙ

Монтик С. В.

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

Одним из способов оптимизации структуры подразделений по техническому обслуживанию автомобилей, т. е. нахождения оптимального количества постов технического обслуживания (ТО) при проектировании или реконструкции автотранспортных предприятий (АТП), является использование системы массового обслуживания и имитационного моделирования, что дает возможность находить коэффициент загрузки постов, время нахождения автомобилей в очереди на обслуживание, ее среднюю длину, а также количество выполненных обслуживаний за определенный период для выбранного варианта структуры.

Рассмотрим применение имитационного моделирования для оптимизации количества постов механизированной мойки автотранспортного предприятия. В качестве объекта для моделирования рассматривается процесс функционирования механизированной мойки автобусов. При оптимизации важным вопросом является определение условий увеличения количества постов мойки, например, перехода от одного к двум постам.

Согласно [1] количеству механизированных моечных постов $\Pi_{\text{МЕХ}}$ определяется по формуле

$$\Pi_{\text{МЕХ}} = \frac{A_{\text{С}} \cdot K_{\text{Т}} \cdot K_{\text{П}}}{T \cdot A_{\text{Ч}}}, \quad (1)$$

где $A_{\text{С}}$ – списочное число подвижного состава, ед.; $K_{\text{Т}}$ – коэффициент технической готовности подвижного состава, определялся по методике [2] для автобуса класса I по ГОСТ 31286-2005 со среднесуточным пробегом 250 км, для которого продолжительность простоя транспортных средств в техническом обслуживании и текущем ремонте составила 0,65 дней/1000 км [3], $K_{\text{Т}} = 0,86$; T – продолжительность работы (принимается равной продолжительности возвращения подвижного состава в предприятие, для количества подвижного состава от 100 до 200 единиц равна 2,8 часа); $K_{\text{П}}$ – коэффициент «пикового» возврата подвижного состава, $K_{\text{П}} = 0,70$; $A_{\text{Ч}}$ – часовая пропускная способность моечного оборудования, принималась 30 автомобилей в час, что соответствует рекомендациям [2], а также выпускаемому в настоящее время оборудованию, например, проездной портальной установке для грузовых автомобилей и автобусов ISTOBAL HW'EXPRESS или мойке автобусов HWD 300 [4].

В дальнейшем при расчете количество автобусов в АТП изменялось таким образом, чтобы расчетное количество постов изменялось от 1,0 до 2,0 постов.

При моделировании зона моечных работ рассматривалась как одна- или многоканальная открытая система массового обслуживания (СМО) с ограничением на длину очереди. Параметры СМО определялись следующим образом.

Интенсивность поступлений автомобилей на мойку λ , автомобилей/час, определялась как

$$\lambda = A_c \cdot K_T \cdot K_{II} / T . \quad (2)$$

Тогда интервал времени $t_{\text{пост}}$, час, через который автомобиль поступит на мойку, составит

$$t_{\text{пост}} = 1/\lambda. \quad (3)$$

Продолжительность выполнения одного обслуживания $t_{\text{обсл}}$, час, на посту механизированной мойки составляет

$$t_{\text{обсл}} = 1/A_{\text{ч}}. \quad (4)$$

Далее с использованием полученных данных об интервалах времени поступления автомобилей на посты мойки и продолжительности обслуживания выполнялось имитационное моделирование работы постов механизированной мойки. Для имитационного моделирования процесса функционирования постов использовалась система GPSS World Student Version 5.2.2. Время моделирования работы постов механизированной мойки равнялось продолжительности возвращения подвижного состава в предприятие.

При составлении имитационной модели процесса функционирования зоны моечных работ посты механизированной мойки рассматривались в виде открытой СМО с простейшими потоками. Моделировались СМО с один и двумя каналами обслуживания, которые соответствуют одному или двум постам, длина очереди ограничивалась. Для одного поста механизированной мойки длина очереди ограничивалась четырьмя автомобилями, т. к. для одного поста механизированной мойки предусматривается один пост ожидания в корпусе ежедневного обслуживания и накопительная площадка перед корпусом, размер которой равен 10 % от пропускной способности поста, что составляет три автомобиле-места. Аналогичный подход использовался для двух постов механизированной мойки. В случае, если пост ожидания и накопительная площадка оказывались заняты, автомобиль не подвергался мойке и поступал на стоянку. Данные автомобили в дальнейшем будут поступать на мойку после завершения «пикового» возврата подвижного состава в предприятие.

Для моделирования простейшего потока требований интервал времени между соседними событиями должен иметь показательное распределение [5]. Поэтому при имитационном моделировании интервалы времени поступления автомобилей на механизированную мойку задавались по экспоненциальному закону с математическим ожиданием, равным $t_{\text{пост}}$, а интервалы времени на обслуживание одного автомобиля – также по экспоненциальному закону с математическим ожиданием равным $t_{\text{обсл}}$.

Результаты имитационного моделирования представлены на рисунках 1–2 и в таблице 1.

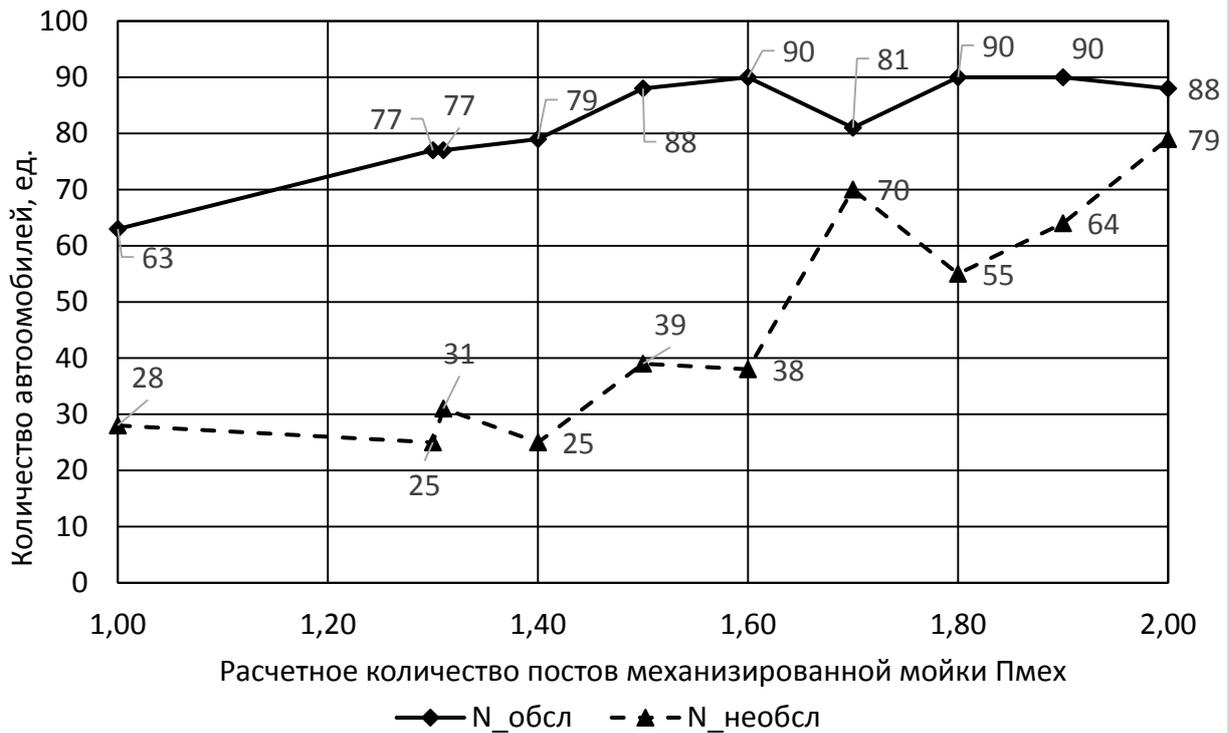


Рисунок 1 – Зависимость количества обслуженных и необслуженных автомобилей от расчетного количества постов механизированной мойки

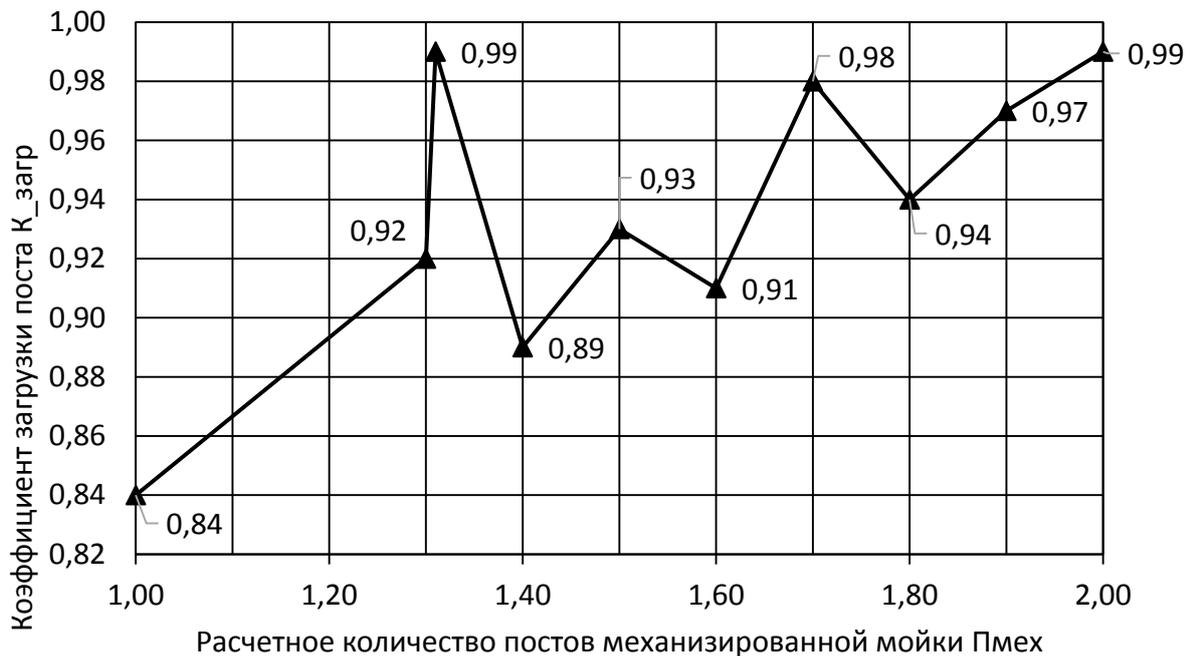


Рисунок 2 – Зависимость коэффициента загрузки поста от расчетного количества постов механизированной мойки

Как видно из рисунков 1 и 2, для одного поста механизированной мойки при расчетном количестве постов 1,31 обеспечивается наибольший коэффициент загрузки поста. При увеличении расчетного количества постов до 1,7 количество необслуженных автомобилей за время «пикового» возвращения подвижно-

го состава в предприятие резко возрастает, поэтому можно рекомендовать использовать два поста мойки при расчетном количестве постов 1,7 и более. При наличии двух постов мойки (см. таблицу 1) необслуженные автомобили отсутствуют. Однако нужно учитывать, что автомобили, не прошедшие мойку, поступают на стоянку на предприятии и в дальнейшем могут пройти мойку после завершения периода «пикового» возврата, что потребует не более трех часов работы моечной установки. При этом стоимость одной моечной установки составляет более 47,5 тысяч евро [4].

Таблица 1 – Результаты имитационного моделирования работы постов механизированной мойки (2 поста)

Расчетное количество постов механизированной мойки	1,30	1,31	1,40	2,00
Количество обслуженных автомобилей, ед.	89	116	117	164
Коэффициент загрузки первого поста	0,743	0,803	0,762	0,871
Коэффициент загрузки второго поста	0,595	0,656	0,620	0,897

Разработанные имитационные модели могут использоваться студентами специальности 1 – 37 01 06 «Техническая эксплуатация» для оптимизации структуры зоны ежедневного обслуживания АТП при выполнении курсового проекта по дисциплине «Производственно-техническая инфраструктура предприятий автомобильного транспорта» и дипломного проектирования.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Общесоюзные нормы технологического проектирования предприятий автомобильного транспорта: ОНТП-01-91. РД 3107938-0176-91. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_94302/. – Дата доступа: 17.09.2022.
2. Проектирование предприятий автомобильного транспорта: учебник/ М. М. Болбас [и др.]; под ред. М. М. Болбаса – Минск. : Адукацыя і выхаванне, 2004. – 528 с.
3. Техническое обслуживание и ремонт автотранспортных средств: ТКП 248–2010 (02190): Минск. – Министерство транспорта и коммуникаций Республики Беларусь, 2010. – 41 с.
4. Сайт ООО «Владирус». Официальный дилер ISTOBAL в РФ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://istobal-rf.ru/>. – Дата доступа: 17.09.2022.
5. Монтик, С. В. Моделирование структуры производственных подразделений по техническому обслуживанию транспортных средств / С. В. Монтик, Ю. А. Головченко, Н. С. Монтик // Вестник Брестского государственного технического университета. – 2017. – № 4: Машиностроение. – С. 66–69.

БОРТОВОЕ ДИАГНОСТИРОВАНИЕ ИМПУЛЬСНЫМ МЕТОДОМ ГИДРОФИЦИРОВАННЫХ ТРАНСМИССИЙ ЛЕГКОВЫХ АВТОМОБИЛЕЙ

Семёнов И. Н.

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

Современные легковые автомобили (ЛА) широко оснащаются новейшими бортовыми электронными системами управления, контроля и диагностики. Движение ЛА происходит в очень разнообразных и нередко сложных условиях. Эти условия преимущественно определяются параметрами дорожных, эксплуатационно-технических, природно-климатических характеристик, маршрутами и фазами движения, режимами нагружения трансмиссий, а также всевозможными опасными и нештатными ситуациями [1].

Функциональные свойства ЛА как технического объекта определяют степень его приспособленности к эксплуатации в качестве транспортного средства. К ним относятся: тягово-скоростные свойства, тормозные свойства, топливная экономичность, устойчивость, управляемость, маневренность, плавность хода, проходимость. Тягово-скоростные свойства ЛА характеризуют его способность перевозить пассажиров с высокой средней скоростью и производительностью. Тормозные свойства ЛА определяют его способность быстро снижать скорость при одновременном исключении заносов с целью уменьшения вероятности дорожно-транспортных происшествий и повышения безопасных скоростей движения. Топливная экономичность характеризует эффективность использования энергии топлива при выполнении работы по перевозке пассажиров.

Эффективное функционирование ЛА в процессе перевозки пассажиров зависит от правильно сформированных тягово-скоростных и топливно-экономических показателей автотранспортного средства. При этом важным является обеспечение его безопасности и надежности. В связи с этим необходимо осуществлять дифференцированный их учет при синтезе алгоритмов управления и диагностики в процессе комплексных исследований их влияния на показатели эффективности и качества, важное значение при этом имеет научно-техническое прогнозирование на стадии проектирования перспективных систем управления и диагностики [1,2].

Трансмиссии современных легковых автомобилей в основном являются гидрофицированными. Их основными частями служат механические и гидромеханические передачи, которые работают в сложных условиях. Элементы (сборочные единицы и детали) этих механизмов, представляющие собой вальные и планетарные коробки передач, постоянно подвергаются знакопеременным нагрузкам. Для обеспечения безопасного движения автомобиля и его работоспособности в целом необходимо непрерывно в режиме реального времени отслеживать техническое состояние этих сложных дорогостоящих передач.

Для оценки технического состояния гидрофицированных трансмиссий (ГТ) ЛА, своевременной постановки технического диагноза, оперативного выявления опасных отказов и скрытых дефектов, предотвращения появления неисправностей и прогнозирования остаточного ресурса необходимо использовать новые информационные технологии и прогрессивные методы, основанные на комплексных экспериментальных и теоретических исследованиях и новых способах обработки результатов [3].

Применению бортовых систем не только на ГТ ЛА, но и на многих автотранспортных средствах (АТС) в целом, сопутствует ряд проблем. Основная из них – это проблема постоянных отказов в трансмиссиях. Существующие подходы к решению проблемы неэффективны и пассивны, т. к. приходится исключать АТС из рабочего цикла в связи с аварийными ситуациями или необходимостью проведения технических обслуживаний и ремонтов, часто преждевременных и необоснованных ни технически, ни экономически [4].

Трансмиссии легковых автомобилей с электронным управлением так же, как и обычные неавтоматизированные трансмиссии – механические и гидромеханические коробки передач – используют гидравлическую систему с рабочей жидкостью для включения муфт и тормозных лент, при этом каждый гидравлический контур управляется электромагнитным (реже – гидравлическим) клапаном.

Под гидрофицированной трансмиссией автотранспортного средства будем понимать такую автоматизированную трансмиссию, которая оснащена электронно-гидравлической системой управления, контроля и диагностики, при этом в ее состав входят гидромеханические или гидродинамические элементы, а также технические средства гидроавтоматики и различные гидроаппараты. Гидрофицированные трансмиссии современных автомобилей, как правило, являются автоматизированными или легко поддаются автоматизации на основе современных средств микроэлектроники и бортовой диагностики.

Многие современные ЛА имеют автоматические коробки переключения передач (АКПП). Эти АКПП являются принадлежностью гидрофицированных трансмиссий (ГТ). Неправильное или несанкционированное управление гидравлическими параметрами рабочего тела (гидравлической жидкости) является основной причиной выхода из строя и уменьшения срока службы АКПП легковых автомобилей.

В момент удара, субъективно воспринимаемого водителем, происходит резкое наполнение рабочей жидкостью подпоршневого пространства и увеличение давления в тормозах планетарного ряда. Все это может снизить ресурс трансмиссии. Для парирования последствий удара необходим специальный способ.

Суть разработанного автором способа, который реализован в импульсном методе, сводится к следующему. Для повышения ресурса гидрофицированной трансмиссии ЛА необходимо увеличить плавность хода и уменьшить ударные нагрузки, воздействующие на нее. Электронный блок управления АКПП не реагирует на ударные нагрузки, а только воспринимает пробуксовки в пакетах фрикционных муфт или лентах, соответственно повышается давление до момента исключения пробуксовки. Когда давление становится слишком высоким, то появляется удар (толчок), возникающий как следствие резкого возрастания

давления жидкости, вызванное также и мгновенным изменением скорости ее течения в магистрали. Такой удар воспринимается как мощный толчок, что негативно сказывается на деталях всей трансмиссии, резко снижая надежность [5].

Данный раздел статьи посвящен разработке эффективного метода осуществления оперативной оценки текущего состояния ГТ ЛА. Таким современным методом, использующим новые технологии, и который может быть успешно реализован в автоматизированных гидрофицированных трансмиссиях, является импульсный метод [4,5].

С помощью импульсного метода можно определить величину толчков, воздействующих на детали трансмиссии, и за счет правильно выстроенных команд исполнительных модулей системы управления / диагностирования по заложенным алгоритмам можно снизить давление вплоть до пробуксовки муфт. После этого электронная система зафиксировывает факт пробуксовки и далее повысит давление до требуемого уровня. Таким образом, обеспечивает плавность процессов включения элементов и повышается ресурс ГТ.

Для восприятия толчков можно дополнительно на картере коробки передач установить датчик детонации.

В качестве критериев оценки технического состояния ГТ ЛА как объекта диагностики нужно выбирать те из них, которые могут указывать на возможность приближения состояния объекта к предельному состоянию, при котором он не способен выполнять свои функции либо выполнение своего функционального назначения экономически нецелесообразно.

Таковыми критериями для автотранспортных средств, имеющими гидрофицированные трансмиссии, могут служить КПД трансмиссии, температура коробки передач, производительность выполнения транспортной работы и др.

В электронных бортовых системах ГТ ЛА в алгоритмах управления используются два основных параметра: скорость движения автомобиля и нагрузка на двигатель. Эти параметры определяются электронными датчиками. Основными из них являются датчики: частоты вращения на входе коробки передач (скорость вращения турбинного колеса гидротрансформатора для ГТ с ГМП), частоты вращения на выходе коробки передач (скорость выходного вала), положения коленчатого вала, температуры рабочей жидкости, положение рычага селектора и переключателя режима работы АКПП, массового расхода воздуха или абсолютного давления во впускном коллекторе и положение педали акселератора. Кроме того, блок управления АКПП получает дополнительную информацию от блока управления двигателем и других электронных систем автомобиля (например, от системы динамического контроля устойчивости автомобиля). Это позволяет более точно, чем в обычной АКПП, определять моменты переключений передач и блокировки гидротрансформатора для коробок с ГМП. Программа переключения передач по характеру изменения скорости при данной нагрузке на двигатель может легко вычислить силу сопротивления движению автомобиля и ввести соответствующие поправки в алгоритм переключения, например, попозже включать повышенные передачи на полностью загруженном автомобиле или невысоком ускорении разгона.

В то же время большой проблемой современных ГТ ЛА является, тем не менее, два негативных фактора. Это снижение надежности управления трансмиссией и то, что заложенные в электронный блок алгоритмы управления искажаются и оказываются недостоверными ввиду проявляющихся неисправностей

гидропривода ГТ. Неисправности в работе электромагнитных клапанах-регуляторах, как механические, так и электрические, являются причиной неправильного управления гидравлическими параметрами рабочего тела и впоследствии приводящие к отказам и снижению надежности гидрофицированных трансмиссий.

Важным этапом исследований является также установление закономерностей изменения параметров рабочего процесса ГТ (амплитуд пульсации давлений, расходов рабочей жидкости, длительности переходных процессов в системе гидропривода управления фрикционами), а также получение статистических характеристик процесса пульсации [5].

Применение импульсного метода в бортовом диагностировании гидрофицированных трансмиссий позволяет осуществить своевременную локализацию неисправностей элементов гидравлического блока управления АКПП, а также корректировать величину давления, подаваемого в тормозные муфты и к лентам, с целью уменьшения нагрузок на детали трансмиссии и для увеличения ресурса и повышения плавности хода.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Рынкевич, С. А. Основы управления и диагностирования автотранспортных средств с применением бортовой микроэлектроники / С. А. Рынкевич // Вестник Курганского государственного университета. Серия «Технические науки». Выпуск 12. – 2017. – № 2 (45) – С. 77–84.

2. Рынкевич, С. А. Методология проектирования подвижных объектов / С. А. Рынкевич // Сб. науч. трудов БНТУ «Транспорт и транспортные системы: конструирование, эксплуатация, технологии»: Минск, 2018. – С. 130–153.

3. Семёнов, И. Н. Повышение надежности гидрофицированных трансмиссий легковых автомобилей / И. Н. Семёнов, С. А. Рынкевич // Автомобиле- и тракторостроение : материалы Международной научно-практической конференции, Минск, 24–27 мая 2019г. / Белорусский национальный технический университет ; редкол.: отв. ред. Д. В. Капский [и др.]. – Минск : БНТУ, 2019. – Т. 1. – С. 48–52.

4. Семёнов, И. Н. Методика повышения надежности гидрофицированных трансмиссий легковых автомобилей: Автотракторостроение и автомобильный транспорт: сборник научных трудов: в 2 т. / отв. ред. Д. В. Капский. – Минск ; БНТУ, 2020. Т.1. – С. 42–45.

5. Семёнов, И. Н. Импульсный метод диагностирования гидрофицированных трансмиссий легковых автомобилей / И. Н. Семёнов // Вестник БрГТУ. – 2019. – № 4 (117) : Машиностроение. – С. 94–96.

СОДЕРЖАНИЕ

УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ, АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА, ПРОМЫШЛЕННАЯ РОБОТОТЕХНИКА

<i>Базарбаев К. А., Олиферович Н. М., Гринюк Д. А.</i> МЕТОДЫ ИДЕНТИФИКАЦИИ НЕПРЕРЫВНЫХ ОБЪЕКТОВ.....	4
<i>Бакаленко В. И., Дейнека Т. А.</i> ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ИЗМЕРЯЕМОЙ СРЕДЫ НА ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕРМОМЕТРОВ	8
<i>Вабищевич Л. И., Ярошевич А. В.</i> КОМПЕНСАТОР РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ БЫТОВЫХ НАГРУЗОК	12
<i>Джумаев А., Атаев Э.</i> УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКИМИ СРЕДСТВАМИ И КОМПЛЕКСНОЙ СИСТЕМОЙ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ.....	17
<i>Кокудович Д. В., Сааков А. В., Прокопеня О. Н.</i> МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕХАТРОННОГО МОДУЛЯ НА ОСНОВЕ СИНХРОННОГО СЕРВОДВИГАТЕЛЯ	23
<i>Кокудович Д. В., Сааков А. В., Вабищевич Л. И., Прокопеня О. Н.</i> МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИВОДА ШАГОВОГО КОНВЕЙЕРА НА ОСНОВЕ СИНХРОННОГО СЕРВОДВИГАТЕЛЯ	27
<i>Королёв А. А., Михновец А. Н., Карнович Д. С.</i> РАСЧЁТ НАДЁЖНОСТИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ С БОЛЬШИМ КОЛИЧЕСТВОМ ОБЪЕКТОВ.....	30
<i>Кудрицкий Я. В., Левданский А. М., Ялковский Н. С.</i> РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ВЫБОРА ТИПОРАЗМЕРА ТОКАРНОГО РЕЗЦА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ РЕЖИМОВ И УСЛОВИЙ ОБРАБОТКИ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ	34
<i>Рязанцева Н. В., Голдобина Т. А., Минин В. Е.</i> ПРОБЛЕМЫ РАСПОЗНАВАНИЯ ЗВУКОВОЙ ИНФОРМАЦИИ В НЕЙРОСЕТЕВОЙ СИСТЕМЕ ОПОВЕЩЕНИЯ ДЛЯ ЛЮДЕЙ С ОГРАНИЧЕННЫМИ СЛУХОВЫМИ ВОЗМОЖНОСТЯМИ	39

НАДЁЖНОСТЬ, ДИАГНОСТИКА И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИЙ МАШИН

<i>Акулич Я. А.</i> ДИАГНОСТИКА ЗОНЫ КОНТАКТА ПОВЕРХНОСТЕЙ ТРЕНИЯ МЕТОДАМИ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ТОМОГРАФИИ	45
<i>Барсуков В. Г., Илькевич М. А., Крупич Б., Голуб В. М., Веремейчик А. И., Хвисевич В. М.</i> ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКОГО КОНТАКТА ТВЕРДЫХ ЧАСТИЦ С ДЕТАЛЯМИ МАШИН	49

Борисова Ю. А., Иголкин А. А. ИССЛЕДОВАНИЯ ПНЕВМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ВАГОНА-ЛАБОРАТОРИИ.....	54
Горбунов В. П., Тюшкевич В. В. НАЗНАЧЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО РЕСУРСА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ	57
Игнатюк В. И. О ДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ТОНКОСТЕННЫХ ПОДКРЕПЛЕННЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ, ПОДВЕРЖЕННЫХ ВНЕШНЕМУ ДАВЛЕНИЮ.....	61
Капустя П. П., Мойсейчик А. Н., Шейбут Г. Е. РАЗРАБОТКА МЕРОПРИЯТИЙ ПО ОПТИМИЗАЦИИ МАССОГАБАРИТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК И НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ МАЧТЫ	66
Медведев О. А., Гетман И. А., Вишневецкий А. И., Сульжниц В. И. АНАЛИЗ ВЗАИМОСВЯЗИ ДОПУСТИМЫХ ПОГРЕШНОСТЕЙ СБОРОЧНЫХ РАБОТ И НЕПОДВИЖНЫХ КОМПЕНСАТОРОВ РАЗНОЙ ДЛИНЫ С ЧИСЛОМ СТУПЕНЕЙ КОМПЕСАЦИИ ПРИ ДОСТИЖЕНИИ ТОЧНОСТИ СБОРКИ МЕТОДОМ РЕГУЛИРОВАНИЯ	72
Монтик С. В. АНАЛИЗ МЕТОДИК ВЫБОРА МОТОР-РЕДУКТОРОВ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРИВОДОВ	76
Назаров С., Рахимов М., Аннабердиев Ш. О РЕШЕНИИ ОДНОЙ МОДЕЛЬНОЙ ЗАДАЧИ ОПТИМАЛЬНОГО КОНСТРУИРОВАНИЯ	81
Сергуцкий Д. С., Григорьев В. Ф. МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ ШУМОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ СТАНКОВ	87
Сотник Л. Л., Дремук В. А. ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ УДАРНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ВЫХОДНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ПРОЦЕССА ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ В ВИБРОВАЛКОВОМ ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЕ.....	91
ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ	
Бочарова Н. В., Самута М. В. РАСЧЕТ РЕБРИСТО-КОЛЬЦЕВОГО КУПОЛА ИЗ ЛЕГКИХ СТАЛЬНЫХ ТОНКОСТЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ	98
Горавский И. А., Жигалов А. Н., Дерман Е. А. МЕТОДОЛОГИЯ ПОВЫШЕНИЯ РЕСУРСА ИНСТРУМЕНТА ИЗ БЫСТРОРЕЖУЩЕЙ СТАЛИ АЭРОДИНАМИЧЕСКИМ ЗВУКОВЫМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ.....	104
Долгих А. М., Андрукович А. П., Косяк Л. Н., Анисимов В. С. ВЛИЯНИЕ ПРОЦЕНТНОГО СОДЕРЖАНИЯ И ВИДА АКТИВАТОРА НА ШЕРОХОВАТОСТЬ ПОВЕРХНОСТИ ДИФфуЗИОННЫХ СЛОЕВ	108

Калугин Ю. К., Лещик С. Д. ВЛИЯНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ ВОЗДЕЙСТВИЯ ИМПУЛЬСНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА СТЕПЕНЬ ИЗНОСА УПРОЧНЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ	112
Лещик С. Д., Лежава А. Г., Исаков С. А., Жуковский В. Е. ВЛИЯНИЕ СТРУЙНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ГАЗООБРАЗНОЙ ОХЛАЖДАЮЩЕЙ СРЕДЫ В ОБЛАСТИ СВАРНОГО ШВА И ЗОНЫ ТЕРМИЧЕСКОГО ВЛИЯНИЯ ПРИ СВАРКЕ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ	115
Лещик С. Д., Калугин Ю. К., Лещик М. С. ИЗУЧЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ГАЛЬВАНИЧЕСКИХ ЭЛЕКТРОЛИТОВ С ДОБАВКОЙ НАНОЧАСТИЦ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОГО ДИСПЕРГИРОВАНИЯ ТВЕРДОФАЗНЫХ МАТЕРИАЛОВ	120
Литвинович А. Н., Голуб В. М., Чучко А. В. БЕСПИЛОТНЫЕ ТРАНСПОРТНЫЕ СРЕДСТВА AGV: КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ, СФЕРЫ ПРИМЕНЕНИЯ, РЕКОМЕНДАЦИИ ДЛЯ МЯСОПЕРЕРАБОТКИ	126
Логвин А. И., Ковпанько В. А., Онысько С. Р., Бочарова Н. В. ИНЖЕНЕРНЫЕ РАСЧЁТЫ ЗУБЧАТЫХ КОЛЁС С ПОМОЩЬЮ SOLIDWORKS SIMULATION	132
Мартиновская О. В., Жорник В. И. ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ НА СОВРЕМЕННОМ ЭТАПЕ РАЗВИТИЯ ОТРАСЛИ	136
Мартиновская О. В., Горбунов В. П., Нерода М. В. МЕТОДИКА ИСПЫТАНИЙ НОВЫХ СВЕРХТВЁРДЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ cBN В КАЧЕСТВЕ ЛЕЗВИЙНОГО ИНСТРУМЕНТА ДЛЯ ЧИСТОВОЙ ОБРАБОТКИ.....	143
Матрунчик Ю. Н., Шлейко Т. А. РОБОТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА БЫСТРОСМЕННЫХ ЗАХВАТОВ И СБОРОЧНЫХ ИНСТРУМЕНТОВ ПРОМЫШЛЕННЫХ РОБОТОВ	147
Мищирук О. М., Нерода М. В., Веремейчик А. И., Холодарь Б. Г. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ ЛАЗЕРНОЙ ЗАКАЛКИ НА ВРЕМЕННОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ СТАЛИ 40X13	151
Овчинников Е. В., Хвисевич В. М., Жуков Ю. А., Веремейчик А. И., Онысько С. Р., Григорьева Т. Ф., Кочнева А. Ю. ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МЕХАНОАКТИВИРОВАННЫХ ТЕРМОПЛАСТИЧНЫХ КОМПОЗИТОВ	156
Пилипенко С. В., Фруцкий В. А. ПЕРЕРАБОТКА БЫВШИХ В УПОТРЕБЛЕНИИ ТРУБ ХОЛОДНОЙ ПИЛЬГЕРНОЙ ВАЛКОВОЙ ПРОКАТКОЙ	160
Семенченко М. В. ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ДИФфуЗИОННОГО НАСЫЩЕНИЯ ПРОВОЛОЧНОГО МАТЕРИАЛА	164
Скасевич А. А., Гайдук А. Н. ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРЫ ПОЛИАМИДА 6 В ПОЛИМЕРНЫХ ИЗДЕЛИЯХ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ FDM-ПЕЧАТИ.....	168

Тихон Е. М.
АНАЛИЗ РЕЖИМОВ ПОДАЧИ СМАЗОЧНО-ОХЛАЖДАЮЩЕЙ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ ПРИ РАСТАЧИВАНИИ ОТВЕРСТИЙ 172

Фетисова Е. А., Коротеев А. О., Коротеева А. А.
ТЕХНОЛОГИЯ ДУГОВОЙ СВАРКИ С ВВЕДЕНИЕМ МОДИФИЦИРУЮЩИХ ГАЗОВЫХ
КОМПОНЕНТОВ В ЗАЩИТНУЮ АТМОСФЕРУ 175

Чекан Н. М., Акула И. П., Сергеенко С. Е., Шнак Е. П.
ЭЛЕКТРОННО-СТИМУЛИРОВАННОЕ ОСАЖДЕНИЕ ГИДРОГЕНИЗИРОВАННОГО
АЛМАЗОПОДОБНОГО УГЛЕРОДА 179

ИНЖЕНЕРИЯ ПОВЕРХНОСТИ. СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ РАСЧЕТА ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ И НАПРЯЖЕНИЙ

Веремейчик А. И., Хвисевич В. М., Холодарь Б. Г.
ТЕМПЕРАТУРНОЕ ПОЛЕ В НОЖЕ ГИЛЬОТИННЫХ НОЖНИЦ ПРИ ДЕЙСТВИИ
ДВИЖУЩЕГОСЯ НОРМАЛЬНО-КРУГОВОГО ИСТОЧНИКА НАГРЕВА..... 188

Овчинников Е. В., Хвисевич В. М., Эйсымонт Е. И., Веремейчик А. И., Возняковский А. А.
ПОВЕРХНОСТНЫЕ ЭФФЕКТЫ В ФОТОПОЛИМЕРНЫХ
НАНОКОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛАХ..... 193

Овчинников Е. В., Хвисевич В. М., Эйсымонт Е. И., Веремейчик А. И., Исраа Акрам
СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ
КОМПОЗИЦИОННЫХ ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ..... 197

Рубаник В. В., Рубаник В. В. мл., Ломач М. С., Дородейко В. Г., Луцко В. Ф.
ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ НА ПРОЦЕСС РКУП
И СВОЙСТВА ПОЛУЧАЕМЫХ ОБРАЗЦОВ 202

**Хвисевич В. М., Парфиевич А. Н., Веремейчик А. И., Савчук С. В.,
Башуцкая С. М.**
ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛА ЛЕМЕХОВ ПЛУГА
ПОЧВООБРАБАТЫВАЮЩИХ МАШИН..... 206

**Хвисевич В. М., Сазонов М. И., Веремейчик А. И.,
Онысько С. Р., Есипчук С. М.**
ПРИМЕНЕНИЕ ДВИЖУЩЕГОСЯ ПЛАЗМЕННОГО ИСТОЧНИКА НАГРЕВА
ДЛЯ УПРОЧНЕНИЯ ИЗДЕЛИЙ ИЗ СТАЛЕЙ И ЧУГУНА..... 211

Веремейчик А. И., Холодарь Б. Г.
ВЛИЯНИЕ ФОРМЫ ВЫХОДНОГО СЕЧЕНИЯ СОПЛА ИСТОЧНИКА
ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СТРУИ НА УРОВНИ ТЕМПЕРАТУРЫ
В ЗОНЕ ТЕРМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ..... 217

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ, ПРОИЗВОДСТВА И ЭКСПЛУАТАЦИИ АВТОМОБИЛЬНОГО ТРАНСПОРТА

Авдейчик Ю. А., Калугин Ю. К.
АНАЛИЗ СПОСОБОВ ПОВЫШЕНИЯ ПОПЕРЕЧНОЙ
УСТОЙЧИВОСТИ И УПРАВЛЯЕМОСТИ АВТОМОБИЛЯ ПРИ ДВИЖЕНИИ 222

Волощук А. А., Березуцкая С. О. ПРИМЕНЕНИЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ СОСТАВЛЕНИИ ОПЕРАТИВНО-СУТОЧНОГО ПЛАНА ТЕКУЩЕГО РЕМОНТА АВТОТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ	226
Дудан А. В., Вигерина Т. В. ПОВЫШЕНИЕ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПЛАСТИЧНОЙ СМАЗКИ, ИСПОЛЪЗУЕМОЙ ДЛЯ ТЯЖЕЛОНАГРУЖЕННЫХ УЗЛОВ ТРЕНИЯ АВТОМОБИЛЕЙ	230
Иванов В. П., Вигерина Т. В. ОПЫТ ПОДГОТОВКИ ИНЖЕНЕРОВ ПО АВТОТРАНСПОРТНЫМ СПЕЦИАЛЬНОСТЯМ.....	233
Капустя П. П., Полещук С. В. ТРАНСМИССИИ КОЛЕСНЫХ ПОГРУЗЧИКОВ С ГИДРОСТАТИЧЕСКИМ ПРИВОДОМ	238
Кострицкий В. В. МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ НЕИСПРАВНОСТЕЙ БЕНЗИНОВОГО ДВИГАТЕЛЯ С РАСПРЕДЕЛЁННЫМ ВПРЫСКОМ ПО КОРРЕКЦИИ КОЭФФИЦИЕНТА ИЗБЫТКА ВОЗДУХА	246
Монтик С. В. ОПТИМИЗАЦИЯ СТРУКТУРЫ ПОДРАЗДЕЛЕНИЙ ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ ОБСЛУЖИВАНИЮ АВТОМОБИЛЕЙ.....	252
Семёнов И. Н. БОРТОВОЕ ДИАГНОСТИРОВАНИЕ ИМПУЛЬСНЫМ МЕТОДОМ ГИДРОФИЦИРОВАННЫХ ТРАНСМИССИЙ ЛЕГКОВЫХ АВТОМОБИЛЕЙ	256

Научное издание

НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И МАТЕРИАЛЫ, АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА

Сборник статей
международной научно-технической конференции

(Брест, 20–21 октября 2022 года)

Ответственный за выпуск: Голуб В. М.
Редактор: Митлошук М. А.
Компьютерная верстка: Вашкевич Ю. А.
Корректор: Дударук С. 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 18.11.2022 г. Формат 60x84 ¹/₁₆.
Бумага «Performer». Гарнитура «Times New Roman».
Усл. печ. л. 15,4. Уч. изд. л. 16,56. Заказ № 1294. Тираж 50 экз.
Отпечатано на ризографе учреждения образования
«Брестский государственный технический университет».
224017, г. Брест, ул. Московская, 267.

ISBN 978-985-493-586-3

