

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Учреждение образования
**«БРЕСТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ»**

**НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И МАТЕРИАЛЫ,
АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА**

Материалы международной научно-технической
конференции

2-3 ноября 2016 года

Брест 2016

УДК 681.5; 539.3; 658.51; 621
Н72

Рецензенты:

директор института технической акустики НАН Республики Беларусь, чл.-кор.
НАН Республики Беларусь, д.т.н., профессор **Рубаник В.В.**
заведующий кафедрой технологии машиностроения ГГТУ
им. П.О.Сухого к.т.н., доцент **Кульгейко М.П.**

Редакционная коллегия:

Драган А.В. – декан машиностроительного факультета БрГТУ, к. т. н.;
Прокопня О.Н. – заведующий кафедрой АТПиП БрГТУ, к.т.н.;
Хвисевич В.М. – заведующий кафедрой СМиТМ БрГТУ, к.т.н.;
Горбунов В.П. – заведующий кафедрой машиноведения БрГТУ, к.т.н.;
Медведев О.А. – заведующий кафедрой технологии машиностроения БрГТУ,
к.т.н.;
Монтик С.В. – заведующий кафедрой технической эксплуатации автомобилей
БрГТУ, доцент, к.т.н.

Новые технологии и материалы, автоматизация производства:

Н72 материалы. междунар. науч.-техн. конф., Брест, 2-3 ноября 2016 г. – Брест:
БрГТУ, 2016. – 252 с.

ISBN 978-985-493-383-2

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

Сборник предназначен для специалистов, работающих в сфере машиностроения, авто-сервиса, 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 978-985-493-383-2

© Издательство БрГТУ, 2016

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

Репозиторий ФРОГТУ

ПРОЕКТИРОВАНИЕ МУЛЬТИКОПТЕРНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

Ширвель П.И., Чигарев А.В., Конон И.И.

Белорусский национальный технический университет,
Минск, Республика Беларусь

При проектировании систем управления и стабилизации любых летательных аппаратов важным этапом является выявление их динамических свойств как объекта управления. В данном проекте исследуется механика управления мобильной мехатронной системой на примере летательного аппарата типа мультикоптер. Отметим, что управление мультикоптером является достаточно сложной проблемой и в тоже время очень интересной задачей. Мехатронно-модульную систему изучаем на прочность, динамику и управление, включая элементы механики полета мультикоптера. Имеется обширная отечественная и зарубежная литература, посвященная построению математических моделей динамики движения летательных аппаратов. Настоящие исследования, в какой-то степени облегчая работу с этой литературой, дают рациональные приемы по выводу уравнений движения мобильных мехатронных систем, предлагают направления их решения и дальнейшей линеаризации, а также изучения статического и динамического равновесия мобильных мехатронно-модульных комплексов.

Мультикоптер (гексакоптер) моделируется, как комбинация шести роторов, работающих по принципу поперечной конфигурации. Конкретнее, рассматривается гексакоптер с известными техническими и физическими параметрами, движением которого можно управлять, изменяя силу тяги роторов двигателей в зависимости от скорости вращения пропеллеров (винтов). Довольно тонкий и легкий крестообразный каркас (рисунок 1) связывает двигатели, которые имеют закрытый корпус. В качестве последних рассматривается использование бесколлекторных двигателей. Все оси вращения винтов жестко закреплены и параллельны. Кроме того, они имеют фиксированный шаг вращения лопастей, потоки воздуха которых направлены вниз, чтобы получить направление подъемной силы вверх. Общее управление мультикоптером осуществляется путем изменения скорости вращения винтов. В качестве регулирующего устройства будет использоваться контроллер, задача которого состоит в стабилизации летающего робота в воздухе путем подачи управляющих сигналов всеми двигателями. Очевидно, что для выполнения качественного регулирования необходимо знать о динамическом поведении объекта.

Считаем, что мультикоптер движется относительно инерциальной системы отсчета, связанной с Землей и заданной декартовыми осями O_1x_1 , O_1y_1 и O_1z_1 , причем ось O_1z_1 направлена противоположно вектору силы тяжести. В центре масс мультикоптера введем две подвижные системы координат: кенигову и связанную с телом.

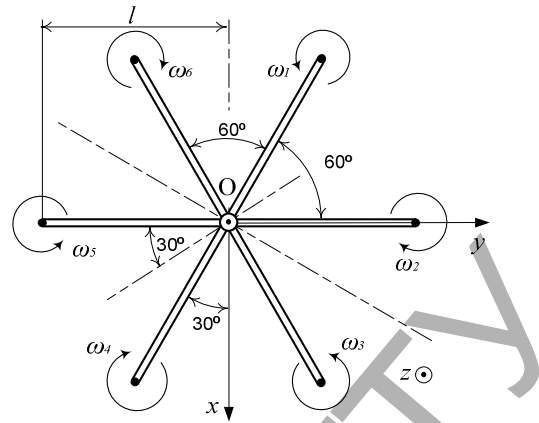


Рисунок 1

Кенигова система координат (с началом в центре тяжести мультикоптера) имеет строго фиксированное направление и ее оси параллельны осям $O_1x_1y_1z_1$ (рисунок 2).

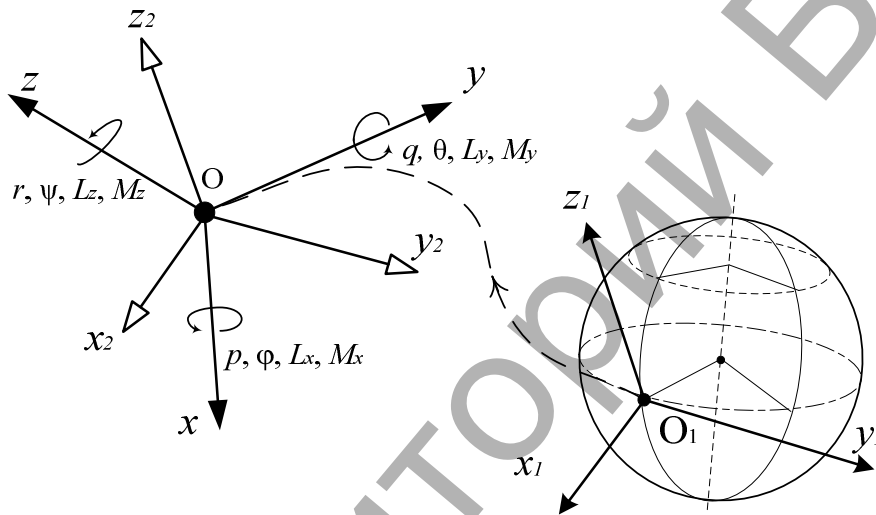


Рисунок 2

Так как управляющая сила прикладывается в подвижной системе координат, то уравнения движения мультикоптера (гексакоптера) будем записывать по отношению к связанной, как бы впаянной в тело, системы отсчета. Оси такой системы (рисунок 3) выходят из центра тяжести исследуемого объекта, который в дальнейшем будем считать неподвижным относительно корпуса аппарата. Ось Ox направлена вдоль строительной оси корпуса по направлению движения вперед. Ось Oy располагают в плоскости симметрии аппарата перпендикулярно оси Ox вправо (поперечная ось). Ось Oz дополняет систему до правосторонней. Связанная система $Oxyz$ неподвижна относительно корпуса мультикоптера. Движение мобильного мехатронного комплекса будем описывать в компонентах действующих сил и моментов, линейных и угловых скоростей, а также текущего положения системы в пространстве.

Таким образом, при выводе дифференциальных уравнений движения рассматриваемой мобильной мехатронной системы делаются следующие допущения:

- мультикоптер рассматривается как абсолютно твердое тело, имеющее 6 степеней свободы – аппарат может совершать 3 линейных и 3 угловых (вращательных) перемещения;

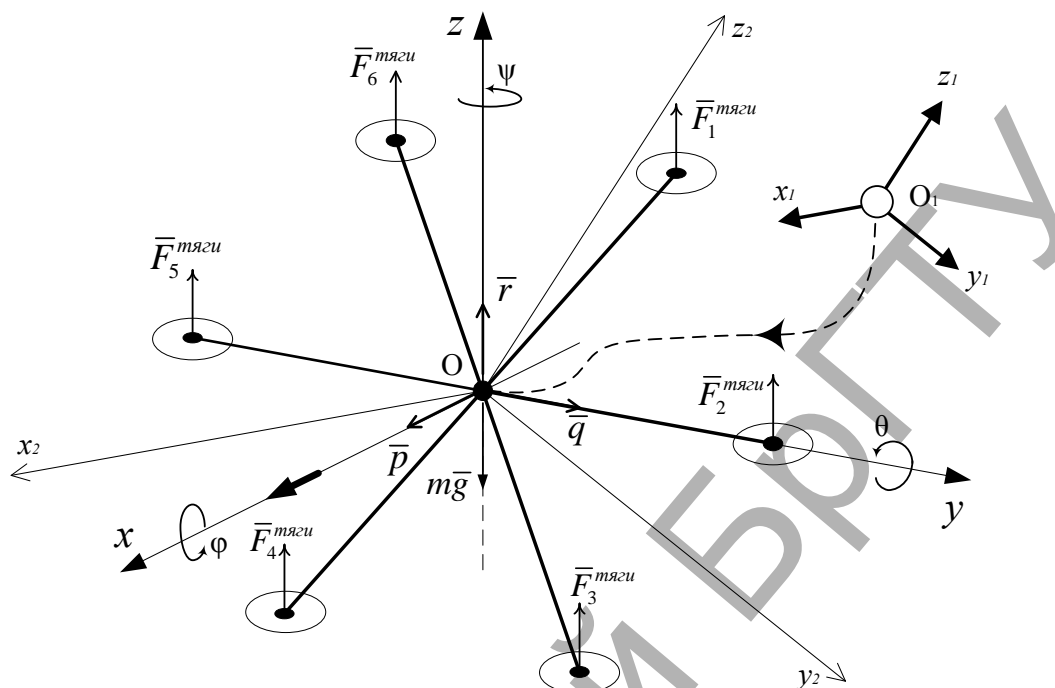


Рисунок 3

- не учитываются влияние ветра, а также сферичность и вращение Земли;
- мультикоптер имеет вертикальную (или вертикальную и продольную) плоскость симметрии;
- моменты инерции летательного аппарата постоянны.

Также принимаем, что динамика мультикоптера полностью определяется его полной массой, положением центра масс и тензором инерции. Здесь имеется в виду, что заданы все внешние силы и внешние связи, которые, в свою очередь, могут зависеть от формы тела или его частей. Детали распределения масс мобильной мехатронной системы никак не сказываются на его движении, т.е. если как-то перераспределить массы внутри летательного аппарата, что не изменится положение центра масс и тензор инерции тела, то не изменится и движение аппарата при заданных внешних силах (хотя, отметим, что при этом, вообще говоря, должны измениться внутренние напряжения в самом твердом теле).

Для оценки движения гексакоптера далее рассмотрим базовую модель, которая состоит из легкой крестообразной несущей конструкции с шестью винтами, установленными на ее концах. Нечетные винты (роторы 1,3,5) вращаются против часовой стрелки, в то время как четные (2,4,6) вращаются по часовой стрелке. Для получения уравнений движения мобильной мехатронной системы разложим движение мультикоптера на поступательное (вместе с центром масс) относительно системы координат $O_1x_1y_1z_1$ и вращательное вокруг центра инерции O . Вообще говоря, для твердого тела конкретных размеров его поступательное и вращательное движения взаимосвязаны. В рассматриваемом случае – движение мультикоптера в пространстве – считаем, что эта взаимосвязь очень слабая. И в дальнейшем будем предполагать, что вращательное движение

происходит независимо от движения центра масс. Угловое положение мобильной мехатронной системы относительно ее центра инерции по трем осям задается углами крена, тангажа и рыскания, определяющими вращение мультикоптера вокруг осей $Ox_2y_2z_2$ ($O_1x_1y_1z_1$) соответственно. Связь между динамическими и кинематическими параметрами в инерциальной и подвижной системе координат будем задавать через матрицу поворота от подвижной к инерционной системе.

УДК 621.865:004.896

РАЗРАБОТКА МЕХАНИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДИНАМИКИ МУЛЬТИКОПТЕРА

Чигарев А.В., Ширвель П.И., Конон И.И.

Белорусский национальный технический университет,
Минск, Республика Беларусь

Настоящий проект подводит некоторый итог научных исследований коллектива авторов. Эти исследования были вызваны задачами определения в реальном режиме времени ориентации мобильных мехатронных систем типа «мультикоптер» с целью обеспечения дальнейших натурных и численных экспериментов в реальном воздушном и виртуальном 3D пространстве. Разработанные математические зависимости позволяют определить ориентацию гексакоптера, когда известны значения опорных физических параметров в данной точке пространства. Также в работе представлен последовательный вывод соотношений для механико-математической модели многофункционального мультикоптера с N двигателями, имеющим в общем случае только одну плоскость симметрии. Конкретнее, рассматривается гексакоптер с известными техническими и физическими параметрами, движением которого можно управлять, изменяя силу тяги роторов двигателей в зависимости от скорости вращения пропеллеров.

Считая мультикоптер твердым телом, рассмотрим движение свободного твердого тела, представленного на схемах выше. Примем, что m – масса аппарата, \bar{v} – скорость центра масс, \bar{L} – кинетический момент аппарата в его движении относительно центра масс, \bar{F} и \bar{M} – главный вектор и главный момент внешних сил относительно точки O . Из основных теорем динамики твердого тела следует, два векторных дифференциальных уравнения:

$$\frac{d(\bar{K}_0)}{dt} = \sum_k \bar{F}_k \text{ и } \frac{d\bar{L}_0}{dt} = \sum_i \bar{M}_i.$$
 Здесь $\bar{K}_0 = m\bar{v}$ – вектор количества движения

мобильной мехатронной системы, \bar{F}_k – действующие внешние силы; $\bar{L}_0 = J \cdot \bar{\omega}$ – вектор кинетического момента относительно центра масс, J – тензор инерции, $\bar{\omega}$ – вектор угловой скорости мультикоптера относительно точки O ; \bar{M}_i – внешние моменты, действующие на мобильную мехатронную систему.

Так как управляющая сила (тяга движителей) прикладывается в подвижной системе координат, жестко фиксированной с телом, запишем уравнения движения в связанной системе $Oxyz$ с учетом возможного вращательного движения аппарата (и одновременно с ним связанной системы координат с угловой скоростью $\bar{\omega}$):

$$\begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{w} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} vr - wq \\ wp - ur \\ uq - vp \end{bmatrix} + \frac{1}{m} \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} vr - wq \\ wp - ur \\ uq - vp \end{bmatrix} + \frac{C_n^b}{m} \begin{bmatrix} F_{x_1} \\ F_{y_1} \\ F_{z_1} \end{bmatrix}$$

Здесь $\bar{F} = F_x \bar{i} + F_y \bar{j} + F_z \bar{k}$; $\bar{\vartheta} = u \bar{i} + v \bar{j} + w \bar{k}$; $\bar{\omega} = p \bar{i} + q \bar{j} + r \bar{k}$; где $\bar{i}, \bar{j}, \bar{k}$ – единичные орты в связанной с телом системе отсчета $Oxyz$, $O_1x_1y_1z_1$ – инерционная система отсчета.

Далее определим координаты сил в проекциях на оси $Oxyz$: сил тяги пропеллеров (задаются в базисе связанной с аппаратом системы); силы тяжести (направлена по местной вертикали в $O_1x_1y_1z_1$, ее далее конвертируем в $Oxyz$ с помощью матрицы поворота C_n^b ; сил, вызывающих дисбаланс во время движения; силы сопротивления окружающей среды. Отметим, что в справочных таблицах значения ускорения свободного падения уже обычно приводятся с учетом переносной силы инерции в зависимости от высоты, поэтому переносная сила фактически уже учтена при задании силы тяжести, входящей в состав внешних сил. В задачах динамики полета показано, что для скоростей, меньших 1 км/с, влиянием Кориолисовой силой инерции и ее моментом можно пренебречь.

Предполагая, в общем случае, что рассматриваемая мобильная мехатронная система типа мультикоптер, с учетом реализации требуемого функционала, может представлять собой аппарат, симметричный относительно вертикальной плоскости, например, x - z (имеет только одну плоскость симметрии), $J_{xy} = J_{yx} = J_{yz} = J_{zy} = 0$ (Oy – центральная ось, O – центр масс), используя динамическое уравнение Эйлера перейдем в систему отсчета, жестко связанную с мультикоптером. В системе $Oxyz$ тензор момента инерции будет постоянен и его можно вынести за производную. Таким образом, разделим изменение кинетического момента на компонент, который описывает изменение величины L и компонент, который компенсирует это изменение в направлении L :

$$\frac{d\bar{L}}{dt} = \frac{\tilde{d}\bar{L}}{dt} + (\bar{\omega} \times \bar{L}).$$

Здесь L – изменение углового момента мультикоптера по отношению к его фиксированным осям; $\frac{\tilde{d}\bar{L}}{dt}$ – локальная производная, вычисляемая в подвижной системе координат $Oxyz$; $\bar{\omega}$ – скорость изменения осей, связанных с аппаратом, по отношению к пространственным осям.

Выражая угловые ускорения и скорости поворота, проведя упрощения и преобразования, получим следующую систему дифференциальных уравнений вращения мультикоптера:

$$\begin{aligned}\dot{\omega}_x &= \frac{I_z M_x}{I_x I_z - I_{xz}^2} + \frac{I_{xz} M_y}{I_x I_z - I_{xz}^2} + \frac{(I_x - I_y + I_z) I_{xz}}{I_x I_z - I_{xz}^2} \omega_x \omega_y + \frac{(I_y - I_z) I_z - I_{xz}^2}{I_x I_z - I_{xz}^2} \omega_y \omega_z; \\ \dot{\omega}_y &= \frac{M_y}{J_y} - \frac{(J_x - J_z) \omega_x \omega_z}{J_y} - \frac{J_{xz} (\omega_x^2 - \omega_z^2)}{J_y}; \\ \dot{\omega}_z &= \frac{I_{xz} M_x}{I_x I_z - I_{xz}^2} + \frac{I_x M_y}{I_x I_z - I_{xz}^2} + \frac{(I_x^2 - I_y I_x + I_{xz}^2)}{I_x I_z - I_{xz}^2} \omega_x \omega_y + \frac{(I_x - I_x - I_z) I_{xz}}{I_x I_z - I_{xz}^2} \omega_y \omega_z.\end{aligned}$$

Здесь M_x, M_y, M_z – проекции суммарного момента сил на связные оси (момент крена, тангажа и рыскания); $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ – проекции вектора угловой скорости мультикоптера на оси связной системы координат; J_x, J_y, J_z, J_{xz} – осевые и центробежные моменты инерции мультикоптера.

Заметим, что в уравнениях выше проекции результирующих моментов на связные оси определены в соответствии с принятым на схеме направлением вращения винтов и для выбранного расположения начала системы координат.

$$\begin{aligned}M &= \begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_x^{тяги} + M_x^{инерц_двигат} \\ M_y^{тяги} + M_y^{инерц_двигат} \\ M_z^{тяги} + M_z^{инерц_двигат} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l/2(2F_2 - 2F_5 + F_1 - F_6 + F_3 - F_4) \\ \sqrt{3}l/2(F_6 - F_4 + F_1 - F_3) \\ k(F_5 - F_6 + F_1 - F_2 + F_3 - F_4) \end{bmatrix} + \\ &+ \begin{bmatrix} \omega_y(\omega_2 - \omega_1 - \omega_3 + \omega_4 - \omega_5 + \omega_6) \\ \omega_x(\omega_1 - \omega_2 + \omega_3 - \omega_4 + \omega_5 - \omega_6) \\ 0 \end{bmatrix} (J_{rotor} + J_{propeller}),\end{aligned}$$

где $M_{тяги}$ – та часть внешнего момента, действующего на мехатронную систему, вызываемая силой тяги пропеллеров двигателей $\bar{F}_{тяги}$, приложенной на расстоянии l от центра тяжести до оси пропеллеров, т.е. моменты, создаваемые винтами; $\bar{M}_{инерц_двигат}$ – гироскопические моменты двигателей и винтов; k – коэффициент перевода силы тяги во вращательный момент; $J_{rotor}, J_{propeller}$ – моменты инерции роторов и винтов.

Таким образом, общая система дифференциальных уравнений движения мобильной мехатронной системы примет вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{u} = vr - wq + F_x / m; \\ \dot{v} = wp - ur + F_y / m; \\ \dot{w} = uq - vp + F_z / m; \\ \dot{p} = \frac{I_z M_x}{I_x I_z - I_{xz}^2} + \frac{I_{xz} M_y}{I_x I_z - I_{xz}^2} + \frac{(I_x - I_y + I_z) I_{xz}}{I_x I_z - I_{xz}^2} pq + \frac{(I_y - I_z) I_z - I_{xz}^2}{I_x I_z - I_{xz}^2} qr; \\ \dot{q} = \frac{M_y}{J_y} - \frac{(J_x - J_z) pr}{J_y} - \frac{J_{xz} (p^2 - r^2)}{J_y}; \\ \dot{r} = \frac{I_{xz} M_x}{I_x I_z - I_{xz}^2} + \frac{I_x M_y}{I_x I_z - I_{xz}^2} + \frac{(I_x^2 - I_y I_x + I_{xz}^2)}{I_x I_z - I_{xz}^2} pq + \frac{(I_y - I_x - I_z) I_{xz}}{I_x I_z - I_{xz}^2} qr. \end{array} \right.$$

Представленные уравнения описывают динамику несимметричного мультикоптера с учетом принятых допущений. Из системы уравнений движения аппарата следует частный случай – динамически симметричного мультикоптера (Oz – центральная ось динамической симметрии тела). Как видно, уравнения являются нелинейными и их точное решение с помощью аналитических методов и стандартных средств в общем случае невозможно.

Для численной оценки движения мультикоптера (гексакоптера), будет рассмотрена базовая модель, которая состоит из крестообразной несущей конструкции с шестью винтами, установленными на ее концах. Нечетные винты (роторы 1,3,5) вращаются против часовой стрелки, в то время как четные (роторы 2,4,6) вращаются по часовой стрелке. При проведении практических расчетов будем считать инерцию двигателей летательного аппарата малой, считая, что гироскопические силы роторов и винтов незначительные.

Заметим, что уравнения, описывающие движение мобильной мехатронной системы значительно упрощаются, если расположить систему координат $Oxyz$ (строительные оси аппарата) по его главным осям инерции (при условии, что мы заранее вычислили направление главных осей инерции летательного аппарата).

Отметим, что расчеты показывают, что принятая вертикальная симметрия мультикоптера, при условии постоянства массы, дает численные значения I_{xz} значительно меньшие, чем I_x , I_y и I_z (т.е. I_{xz} при проведении оценочных расчетов в дальнейшем можно будет в определенной степени пренебречь). Дальнейшее исследование уравнений движения мультикоптера, а также их решение осуществляется с использованием методов компьютерного моделирования (численное решение).

УДК 681.5

УПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЕМ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ ПРИ АВТОМАТИЗАЦИИ СКЛАДОВ

Прокопья О.Н., Никонов М.Н.

Мобильные роботы широко применяются в промышленности. Известны различные системы навигации и способы управления движением данных роботов. Однако они, либо отличаются высокой сложностью, либо обеспечивают невысокую точность управления. Поэтому проблема создания эффективных систем управления движением мобильных роботов по-прежнему остается актуальной.

Требования к системе управления робота могут варьироваться в широких пределах в зависимости от выполняемой операции. В данной работе рассматривается робот для обслуживания склада готовой продукции. В этом случае траектория движения робота фактически является фиксированной. Фрагмент такой траектории показан на рисунке 1. Она может быть представлена прямолинейными участками и дугами окружности, которые сопрягаются друг с другом в опорных точках.

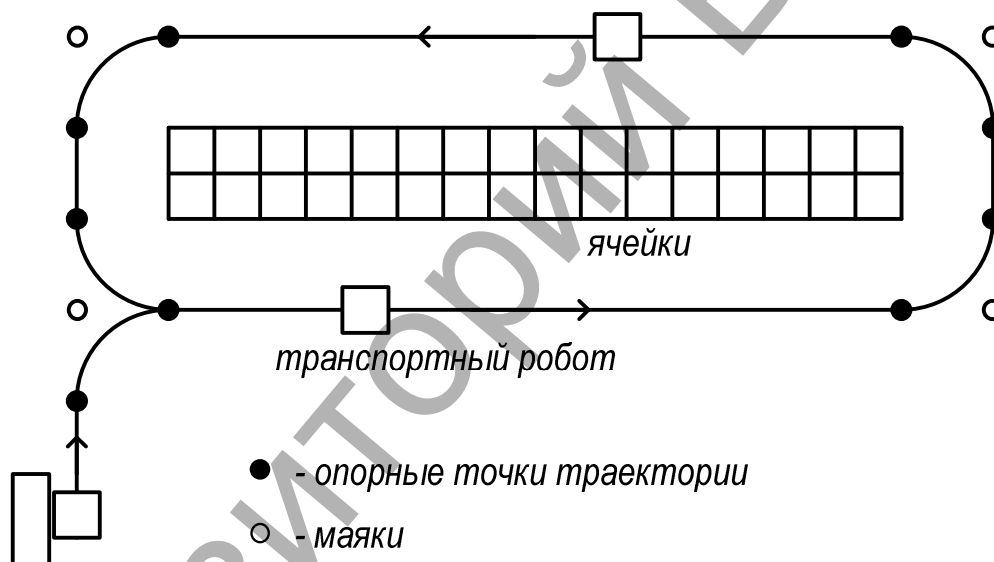


Рисунок 1 – Участок траектории движения робота

В подобных ситуациях часто траекторию задают с помощью цветной линии, магнитной проводки и другими аналогичными способами, что имеет свои недостатки. В данной работе решалась задача управления движением на основе информации от внутренних датчиков робота с минимальным использованием внешних средств. Так для движения по замкнутому контуру используется четыре маяка, установленные в угловых точках, как показано на рисунке 1. Это могут быть цветные маркеры, радиомаяки и т.п. Предполагается, что внутренние датчики позволяют определять расстояние до маяка и угол его отклонения от продольной оси робота. Алгоритм управления движением при этом может быть следующим. Оказавшись на прямолинейном участке траектории, робот фиксирует отклонение маяка от продольной оси и стремится свести это отклонение к нулю в процессе движения, т.е. движется на маяк, пока

расстояние до него не станет равным радиусу дуги окружности. Далее робот движется по дуге под управлением внутренних датчиков. После поворота на заданный угол робот фиксирует положение следующего маяка и процесс повторяется.

В данной работе использован разработанный ранее алгоритм управления двигателем модулем, который обеспечивает перемещение под заданным углом в целевую точку с заданными координатами на основе информации о текущем положении этой точки относительно робота (аналогично положению маяка) [1, 2]. Данный алгоритм был модифицирован таким образом, чтобы текущее положение целевой точки определялось на основе датчиков угла поворота колес. Это дает достаточно высокую точность вычисления при условии отсутствия проскальзывания колес, что может быть обеспечено в случае использования одного двигательного модуля и установки датчиков угла поворота на двух неприводных колесах. Математическая модель робота, разработанная с учетом указанных особенностей в приложении SIMULINK среды программирования MATLAB, приведена на рисунке 2.

Система управления содержит каналы регулирования скорости перемещения и угла поворота. Для каждого из каналов были опробованы различные типы регуляторов. Приемлемые результаты получены при использовании пропорционального регулятора в канале регулирования скорости и пропорционально-дифференциального регулятора в канале регулирования угла поворота. Хорошее качество регулирования также обеспечивается при синтезе приводов методом размещения полюсов.

Результаты моделирования показали, что робот способен в автономном режиме осуществлять перемещение в заданную точку с поворотом на заданный угол (в рассматриваемом случае на 90 градусов) по траектории близкой к дуге окружности. Форма траектории при заданном радиусе 2 м приведена на рисунке 3. Следует отметить, что в данном случае не является обязательным, чтобы движение на угловых участках траектории осуществлялось именно по окружности. Важно, что попадание в заданную точку производится с отклонением, не превышающим 5 см по координатам и 1-2 градусов по углу. Данное условие выполняется в широком диапазоне задаваемых радиусов и скоростей перемещения.

Рассматриваемый робот в соответствии с выполняемой операцией должен с одной стороны, обеспечивать максимальную производительность, с другой – двигаться с ограниченным ускорением во избежание опрокидывания грузов, уложенных друг на друга стопкой. Это может быть обеспечено за счет соответствующего управления скоростью.

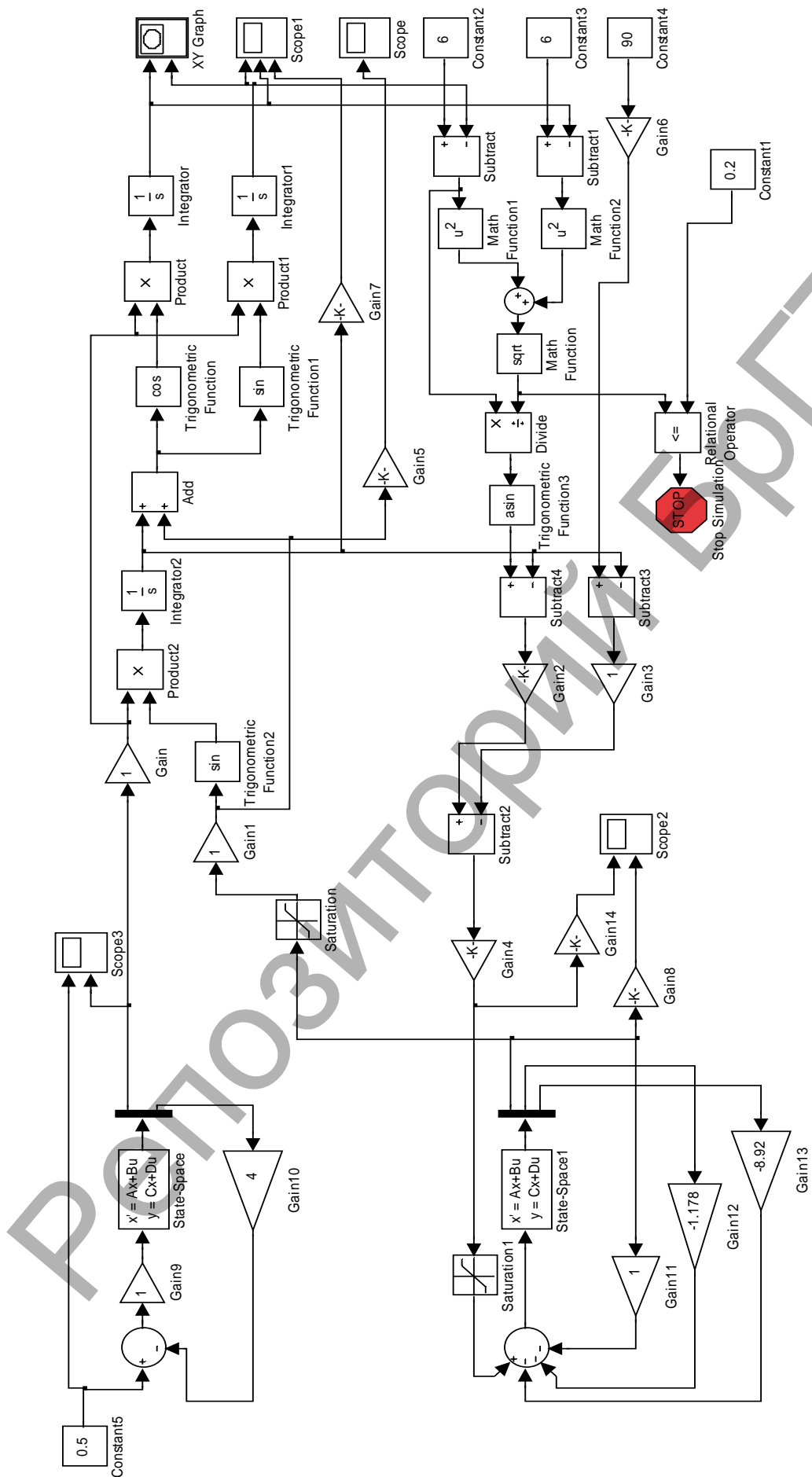


Рисунок 2 – Математическая модель системы управления модулем в приложении Simulink

Движение по окружности осуществляется с постоянной скоростью, рассчитываемой, исходя из величины радиуса и предельного значения нормального ускорения. На прямолинейных участках движение осуществляется с максимальной скоростью, а разгон и торможение производится при ограниченном ускорении.

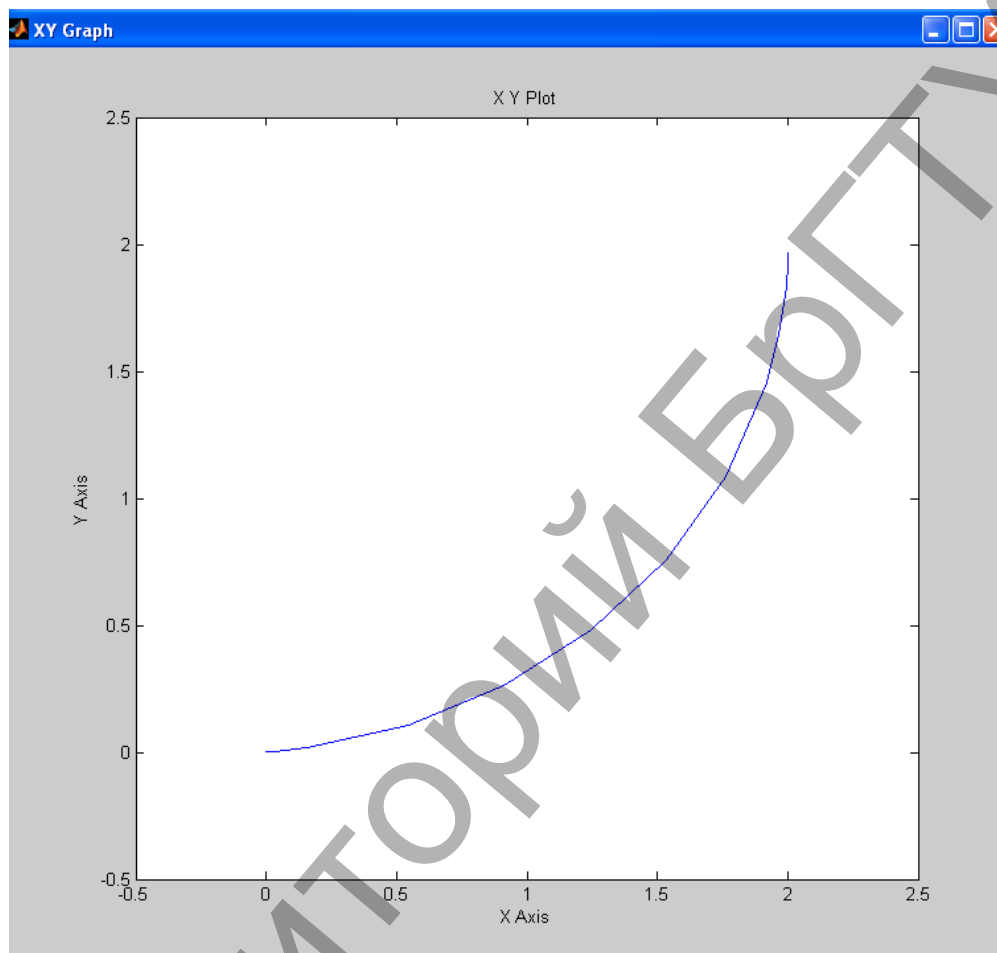


Рисунок 3 – Форма траектории по результатам моделирования

Таким образом, результаты математического моделирования подтверждают эффективность предложенной системы управления движением мобильного робота. Ее можно использовать для управления роботами при автоматизации складов.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Прокопеня О.Н., Козлович К.А., Халитов В.В. Система управления двигательным модулем мобильного робота // Материалы республиканского научно-практического семинара «Автоматизация и роботизация процессов и производств», Минск, 13 февраля 2014 г. / «Бизнесофсет» – Минск, 2014. – С. 65–67.
2. Штеттер Р., Прокопеня О.Н., Козлович К.А. THE PROBLEM OF MOBILE ROBOTS MOVEMENT CONTROL // Материалы международной научно-технической конференции «Новые технологии и материалы, автоматизация производства», Брест, 29 – 30 октября 2014 г. / БрГТУ – Брест, 2014. – С. 4–6.

РАЗРАБОТКА ОПТИМАЛЬНОГО РЕЖИМА ПЕРЕМЕЩЕНИЯ РОБОТА-МАНИПУЛЯТОРА В ГАЛЬВАНИЧЕСКОЙ ЛИНИИ

Овцов С. А.¹, Карнович Д. С.¹, Сарока В. В.¹

1) Белорусский государственный технологический университет Минск, Республика Беларусь

Поставим комплексную задачу оптимального управления движением автооператора с подвеской. Эта задача заключается в том, что необходимо найти оптимальное управление движением автооператора при устранении колебаний подвески до момента остановки. Такая постановка задачи позволяет разгонять порталый автооператор по любому закону, при этом колебания подвески сохраняются в течение установившегося движения.

Для исследований примем двухмассовую модель механизма передвижения автооператора (рисунок 1), которая достаточно широко используется в задачах исследования динамики движения автооператора и оптимизации его движения.

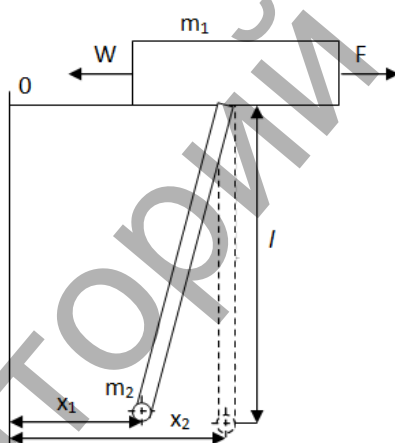


Рисунок 1 – Модель системы «рама-подвеска»

Приведена расчетная схема (рис. 1) описывается системой дифференциальных уравнений [3]

$$\begin{cases} m_1 \dot{x}_1 + m_2 \dot{x}_2 = F - W \operatorname{sign} \dot{x}_1, \\ \ddot{x}_2 + \frac{g}{l} (x_2 - \bar{o}_1) = 0 \end{cases} \quad (1)$$

где m_1, m_2 - приведенная масса рамы автооператора и подвески с грузом;

x_1, x_2 - координаты центров масс соответственно рамы и подвески;

g - ускорение свободного падения;

l - длина подвески,

F - суммарное тяговое или тормозное усилие;

W - приведенная сила сопротивления перемещению рамы.

Считать, что при перемещении рамы в течение торможения рама не меняет свою скорость, то есть $\operatorname{sign} \dot{x}_1 = 1$. Приведенную систему дифференциальных

уравнений можно свести к одному уравнению второго порядке относительно разницы перемещений $x=x_1 - x_2$:

$$\ddot{x} + \omega^2 x = \frac{F - W}{m_1}, \quad (2)$$

где $\omega = \sqrt{\frac{(m_1 + m_2)g}{m_1 l}}$ – частота собственных маятниковых колебаний груза относительно подвижной точки подвеса.

Дифференциальное уравнение (3) можно представить в виде системы канонических уравнений, если принять следующие обозначения $u = \frac{F - W}{m_1}$, $y_1 = x$:

$$\begin{cases} \dot{y}_1 = y_2 \\ \dot{y}_2 = u - \omega^2 y_1. \end{cases} \quad (3)$$

На управление накладываются ограничения в виде неравенства: $|u| \leq u_{\max}$.

В качестве критерия оптимизации выберем комплексный (кинематико-динамический) интегральный критерий, который отражает в соответствующих пропорциях величину квадрата отклонения подвески с грузом от вертикали и величину квадрата динамической составляющей приводного усилия

$$I = \int_0^T \left[k_1 x^2 + k_2 \left(\frac{F - W}{m_1} \right)^2 \right] dt, \quad (4)$$

где k_1 и k_2 – коэффициенты, стоящие при единичных условиях и которые можно записать в виде

$$\begin{cases} k_1 = \delta_1 \bar{I}_1^{-1}, \\ k_2 = (1 - \delta_1) m_1^2 \bar{I}_2^{-1}, \end{cases} \quad (5)$$

где δ_1 – весовой коэффициент, учитывающий важность первого слагаемого в подынтегральном выражении критерия (4);

\bar{I}_1, \bar{I}_2 - минимально возможные значения единичных критериев.

Такая структура критерия позволяет получить оптимальное, по Парето, управление движением автооператора.

Поясним выбор именно такого критерия. По некоторым видам операций р транспортировки рамы требуется, чтобы величина отклонения подвески с грузом от вертикали была минимальной.

Что касается минимизации динамической составляющей приводного усилия, то это позволит уменьшить электрические потери в обмотках двигателя, поскольку эквивалентный момент асинхронного двигателя и двигателя постоянного тока независимого возбуждения примерно пропорциональны эквивалентного тока, которым и определяются электрические потери [1].

С учетом введенных выше обозначений критерий по выражению (5) можно переписать в виде

$$I = \int_0^T \left[k_1 y_1^2 + k_2 u^2 \right] dt \quad (6)$$

Для минимизации критерия (6) используем метод динамического программирования Р. Беллмана. Основное функциональное уравнение запишем так [2]:

$$\min \left[k_1 y_1^2 + k_2 u^2 + \frac{\partial S}{\partial y_1} y_2 + \frac{\partial S}{\partial y_2} (u - \omega^2 y_1) \right] = 0 \quad (7)$$

где S - функция Беллмана.

Минимум правой части уравнения (7) искать по параметру управления u , для чего продифференцируем ее по u и приравняем к нулю:

$$2k_2 u + \frac{\partial S}{\partial y_2} = 0 \quad (8)$$

Найдем из уравнения (8) управления u :

$$u = -\frac{1}{2k_2} \frac{\partial S}{\partial y_2}. \quad (9)$$

Подставим полученное в уравнение (7), в результате чего получим

$$k_1 y_1^2 + \frac{\partial S}{\partial y_1} y_2 - \frac{\partial S}{\partial y_2} y_1 \omega^2 - \frac{1}{4k_2} \left(\frac{\partial S}{\partial y_2} \right)^2 = 0. \quad (10)$$

Уравнение (10) является нелинейным дифференциальным уравнением в частных производных. Искать его решение в виде квадратичной формы, как это принято при решении подобных задач:

$$S = A_1 y_1^2 + A_2 y_1 y_2 + A_3 y_2^2, \quad (11)$$

где A_1, A_2, A_3 – постоянные коэффициенты, которые необходимо определить.

Возьмем частные производные выражения (10) по параметрам

$$\frac{\partial S}{\partial y_1} = 2A_1 y_1 + A_3 y_2, \quad (12)$$

$$\frac{\partial S}{\partial y_2} = A_3 y_1 + 2A_2 y_2, \quad (13)$$

Подставим выражения (12) и (13) в уравнение (10) и получим:

$$\left(k_1 - \frac{A_3^2}{4k_2} - A_3 \omega^2 \right) y_1^2 + \left(A_3 - \frac{A_2^2}{k_2} \right) y_1 y_2 + \left(2A_1 - \frac{A_2 A_3}{k_2} - 2A_2 \omega^2 \right) y_2^2 = 0. \quad (14)$$

Уравнение (14) будет справедливым в том случае, когда выражения в скобках будут равны нулю, поскольку $y_1 \neq 0, y_2 \neq 0$. Поэтому уравнение (14) можно заменить на систему нелинейных алгебраических уравнений:

$$\begin{cases} k_1 - \frac{A_3^2}{4k_2} - A_3 \omega^2 = 0, \\ A_3 - \frac{A_2^2}{k_2} = 0, \\ 2A_1 - \frac{A_2 A_3}{k_2} - 2A_2 \omega^2 = 0. \end{cases} \quad (15)$$

Решение системы уравнений (15) будет иметь два действительных и два комплексных корня. Выберем один действительный корень, не приводит к по-

тере устойчивости системы, поскольку движение системы при этом является плавным, а максимальная величина управления - незначительной.

Подставив найденные корни в выражение (9), получим функцию оптимального управления:

$$u = \frac{y_1 \left[k_2 \omega^2 - \sqrt{k_2 (k_1 + k_2 \omega^4)} \right] - \sqrt{2} y_2 \sqrt{k_2 \left[\sqrt{k_2 (k_1 + k_2 \omega^4)} - k_2 \omega^4 \right]}}{k_2}. \quad (16)$$

Итак, нам удалось синтезировать функцию управления $u = u(y_1, y_2, k_1, k_2, \omega)$.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Ловейкин, В.С. Комплексный синтез оптимального управления движением грузоподъемного крана. / В.С. Ловейкин, Ю.О. Ромасевич // Автоматизация производственных процессов в машиностроении и приборостроении – Киев, 2011.
2. Понтрягин, Л.С. Математическая теория оптимальных процессов / Л.С. Понтрягин, В.Г. Болтнянский, Р.В. Гамкрелидзе, Е.Ф. Мищенко – М.: Физматгиз, 1961. – 392 с.
3. Комаров М.С. Динамика грузоподъемных машин / М.С. Комаров. – М.: Машиностроение, 1969. – 206 с.

УДК 004.89

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ С ДИНАМИЧЕСКОЙ МАСШТАБИРУЕМОЙ АРХИТЕКТУРОЙ НА ОСНОВЕ СХЕМ С ПРОГРАММИРУЕМОЙ ЛОГИКОЙ

Шуленков Р.А.

Белорусский государственный технологический университет

Классическая теория автоматического управления технологическими процессами базируются на применении PID регулятора, Fuzzy регулятора, гибридного регулятора и адаптивного регулятора. Зачастую сложно прогнозировать поведение технологической системы управления в стрессовых ситуациях, в процессах старта системы, эмпирическое поведение в практических действительностях функционирования системы. Прогнозирование так же, отличается от теоретического моделирования системы и управления системы, на основе объекта управления, результат не прогнозируемого поведения увеличивает материальные затраты [1].

Реализация алгоритма на базе раздела искусственного интеллекта – машинного обучения, с применением, численных методов оптимизации, дискретного анализа, базы знаний управления технологическим процессом, математической статистики и прогнозирования, теории автоматического управления и теории нечетких множеств, позволяет формировать алгоритм управления технологическим процессом максимально адаптированный для практического применения.

Реализация алгоритма предусматривает создание IP ядра, необходимого для быстрого принятия решения на основе эмпирических данных принятых пери-

ферией SoC, и дальнейшей обработки его FPGA SoC с результирующим выходным воздействием (рисунок 1).

Программное обеспечение, работающее на Embedded Linux, не может получить доступ к физическим адресам периферийного устройства HPS без специальной процедуры. Физический адрес должен быть предоставлен в пространстве пользователя перед тем, как периферия будет доступна. В качестве альтернативы, драйвер специализированного устройства может быть добавлен в ядро, в качестве модуля. Адреса управления периферией задаются с помощью регистров управления [2].

Система сборки, встраиваемой системы, включает следующие этапы:

- ARM Cross Compiler: GCC (Linaro GCC)
- Bootloader: U-Boot (Das U-Boot – универсальный загрузчик)
- Linux Kernel (kernel, modules, device tree binaries)
- Root File System

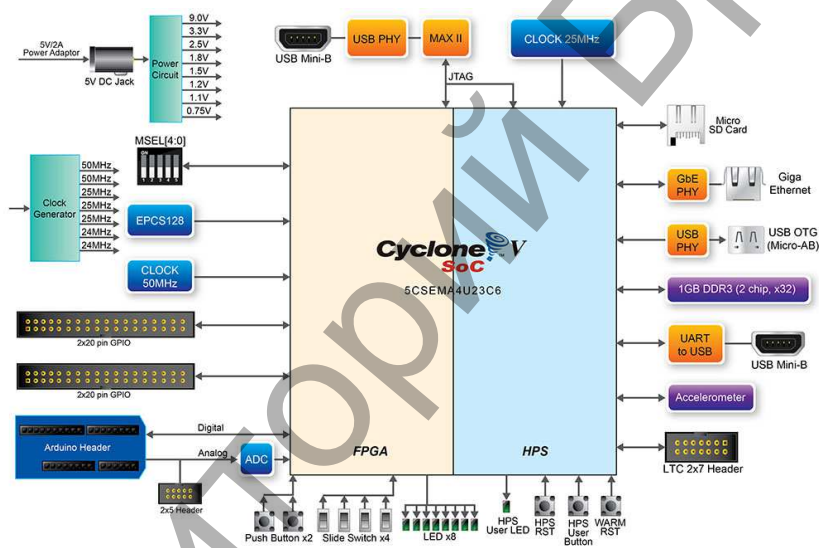


Рисунок 1 – Схематическая диаграмма DE0-Nano-SoC Kit

Алгоритм: при старте системы, загружается база данных А – данные поведения ранее установленной системы, и база В – словарь (база) за ранее предоставленной системы. Словарь В имеет функционал обновления поведения технологических процессов, обновления происходит через сервер в рамках IoT (Internet of Things). База А загружается на сервер для модификаций и обучения устройств, связанных с регулированием технологических процессов, для дальнейшего анализа и прогнозирования процессов управления технологическими процессами. Обучение на примерах, при котором интеллектуальная система предоставляет набор положительных и отрицательных примеров, связанных с заранее неизвестной закономерностью. Для обучения устанавливаются границы применения метода минимизации эмпирического риска (рисунок 2).

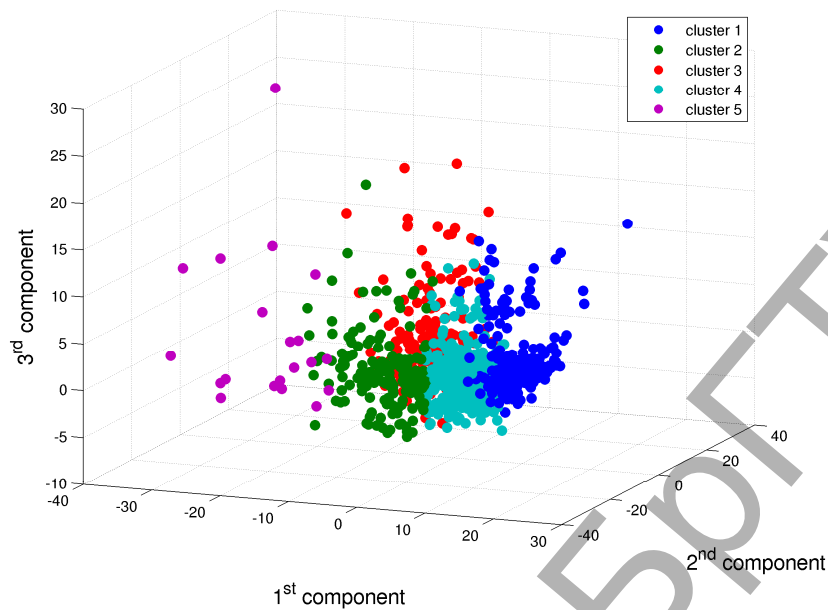


Рисунок 2 – Диаграмма выбора данных для анализа машинного обучения регулятора

Происходит загрузка ранее установленной модели управления технологическим процессом, и параллельно происходит поиск и адаптация уже текущих настроек классического закона управления технологическими процессами, обновление базы знаний.

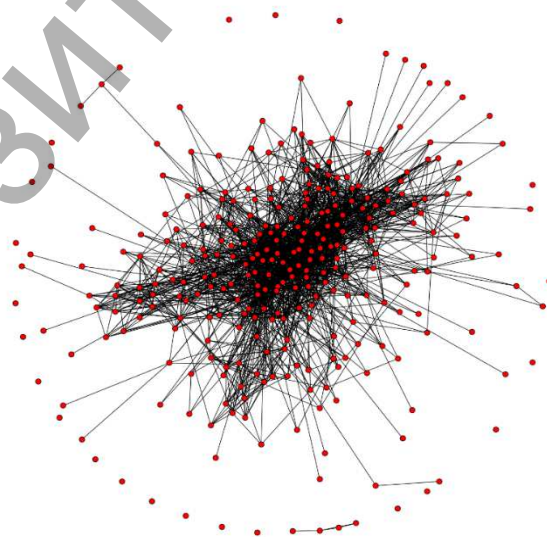


Рисунок 3 – Граф анализа и структурирования данных

Адаптация модели происходит в границе минимизации риска поведения и отклонения системы для системы автоматического управления[3]. Границы по-

ведения системы могут повлиять на переключение системы управления с адаптированной с классическим законом управления на адаптированную с нечетким контроллером.

Входные данные характеризуют различие между реальным и желаемым состоянием объекта управления технологическими процессами, данные подвергаются фаззификации и выполняют роль формирователя роли управления на уровне исполнения. Происходит адаптация нечеткого вывода и дефаззификация. База правил формирователя нечеткой продукции, изменяет нечеткий вывод. Теоретической объект управления во множестве фаззификации и дефаззификации формирует корректор базы правил (рисунок 3).

От точности и правильности настройки регулятора зависит качество работы технологической системы, которое в наибольшей степени определяет экономический эффект. IoT совместно с SoC регулятора, способен перестроить экономические процессы и процессы управления технологическим процессом для увеличения прибыли и снижения затрат ресурсов при производстве конечного продукта.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Кузьмицкий И.Ф. Теория автоматического управления [Текст]: учебник/И.Ф. Кузьмицкий, Г.Т. Кулаков; Белорусский государственный технологический университет. - Минск: [БГТУ], 2010. - 573 с.

2. Cyclone V FPGAs & SoCs [Электронный ресурс]//Altera Corporation: [сайт]. Режим доступа: <https://www.altera.com/products/fpga/cyclone-series/cyclone-v/support.html> (дата обращения: 07.10.2016).

3. Школа Анализа Данных (Яндекс): Машинное обучение: Информация [Электронный ресурс]// НОУ «ИНТУИТ»: [сайт]. Режим доступа: <http://www.intuit.ru/studies/courses/13844/1241/info> (дата обращения: 07.10.2016).

УДК 621.396

ПРОГРАММНЫЙ МОДУЛЬ ОПТИМИЗАЦИИ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ОБЪЕКТОВ

Здор Г.Н., Садоменко С.Л., Лившиц Ю.Е.

Белорусский национальный технический университет

Минск, Республика Беларусь

В последнем двадцатилетии в мире отмечается быстрое развитие нейроинформационных технологий. Актуальность данного направления подтверждается большим количеством различных применений: автоматизация процессов распознавания образов, адаптивное управление, аппроксимация функционалов, прогнозирование, создание экспертных систем и многие другие [1].

Высокая эффективность нейроинформационных технологий при решении задач адаптивного управления динамическими объектами может сделать их незаменимым при создании систем автоматического управления. Уже сейчас достаточно очевидно, что объединение нейронных сетей с другими технологиями будет способствовать существенному прорыву в решении многих актуальных проблем [2].

В современном водопроводно-канализационном хозяйстве существует масса проблем, связанных как с изношенностью основных фондов, так и с нерациональной схемой использования ресурсов. Наиболее ярко проблемы проявляются на крупных насосных станциях. Использование нейроиформационных технологий для оптимизации современного водопроводно-канализационного хозяйства является новым этапом в развитии отрасли.

В Республике Беларусь реализовано большое количество автоматизированных систем на базе оборудования Mitsubishi Electric, потребляющих значительные объемы электроэнергии. Например, системы управления группой насосов, системы управления и защиты канализационных насосов, системы управления повысительных насосов. Поэтому разработка программной платформы для оптимизации энергопотребления в таких системах является актуальной.

Задача повышения энергоэффективности оборудования и оптимизация режимов его работы - важный этап в развитии любой системы автоматического управления. Главной особенностью решения данной задачи являются качество и характеристики используемого оборудования. Предъявляется определенное требование по возможности интеграции различных программных платформ с контроллерным оборудованием для доступа к информации в системе по различным интерфейсам и каналам связи. Благодаря наличию такого программного компонента как MxComponent, автоматизированные системы на базе оборудования Mitsubishi Electric идеальный пример систем, удовлетворяющих необходимые требования для их оптимизации с помощью специальных программных решений с использованием элементов искусственного интеллекта. Имея возможность считывания блоков регистров, можно получить временные срезы данных для их последующего анализа.

Реализованная программная платформа позволяет собирать в базе данных параметры системы, предоставляет аналитический инструмент для их первичного анализа исследователем, а также позволяет реализовать и интегрировать новые алгоритмы управления на базе элементов искусственного интеллекта.

Задача программной платформы - предоставить исследователю удобный инструмент для анализа технологического процесса, не останавливая процесс и не вмешиваясь в логику его работы.

В ситуации, когда автоматизированная система управления не имеет централизованной базы данных, либо доступ к ней невозможен, вариант исследования и оптимизации становится достаточно сложной задачей, так как для полного анализа необходимы данные за большие промежутки времени. Еще более сложной задачей является обработка данных и предоставление их в удобном для анализа виде. В конечном итоге, необходимо разработать новый алгоритм и протестировать его, не вмешиваясь в логику работы существующей системы. Эти проблемы решаются с помощью разрабатываемой платформы.

Система оптимизации реализована на платформе .Net с помощью языка программирования C# по технологии WinForm. Выбор технологии обусловлен опытом разработки программ и наличием стека компонентов для решения всех поставленных задач [3].

В связи с использованием .NET Framework была выбрана система управления реляционными базами данных MS SQL Server, так как она нативно поддерживается программами, реализованными на .NET Framework.

Система работает с оборудованием Mitsubishi Electric при помощи программного компонента MxComponent. Компоненты MX представляют простой, но мощный инструмент, позволяющий без больших затрат соединить контроллер Mitsubishi с программой, написанной под .NET [4].

Для начала необходимо настроить связь с контроллером при помощи специальной утилиты. Возможны следующие виды соединений: последовательное (порт ЦП), последовательное через Computer Link (RS232C, RS422), Ethernet и CC-Link. Кроме того, поддерживаются все сети MELSEC. Для модульного контроллера MELSEC System Q поддерживается также порт USB [4].

Система предусматривает индивидуальный доступ по запараметрированным ранее путям коммуникации ко всем операндам контроллера (считывание/запись). Можно также самостоятельно создать путь коммуникации с помощью элементов ActiveX [4].

Общеизвестно, что насосные станции являются «сердцем» любой системы водоснабжения и водоотведения и одновременно основным потребителем электроэнергии в таких системах. На данный момент большинство водопроводных и канализационных станций водоканала работает с недопустимо низким КПД насосных агрегатов и перегрузкой электродвигателей, что постоянно приводит к перерасходам электроэнергии и к повышенному износу насосного и электротехнического оборудования.

В качестве объекта исследования и оптимизации, на котором произведена апробация системы, выступила повысительная насосная станция, система управления которой выполнена на базе оборудования Mitsubishi Electric (см. рисунок 1).

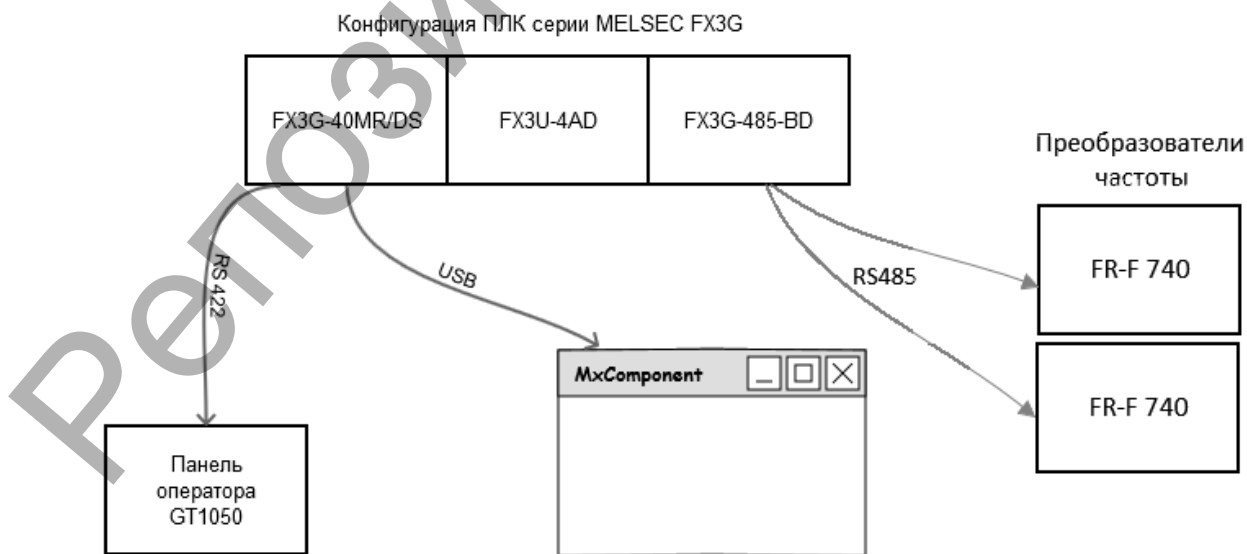


Рисунок 1 - Структурная схема системы оптимизации энергопотребления

Задача состояла в том, чтобы проанализировать повысительную насосную станцию, определить режимы ее текущей работы и снизить энергопотребление.

По результатам анализа целесообразно разработать алгоритм оптимального управления станцией на основе большого количества архивных данных с использованием элементов искусственного интеллекта и произвести оценку результатов.

В результате внедрения программной платформы для оптимизации энергопотребления на повысительных насосных станциях, состоящих из шкафов управления на базе оборудования Mitsubishi Electric, разработаны нечеткие-нейронные алгоритмы, оптимизирующие режимы работы насосного оборудования и станций в целом, что привело к повышению энергоэффективности на 10%.

Реализованная платформа это, в первую очередь, программный интерфейс для анализа объектов и реализации сложных алгоритмов управления. Визуальный интерфейс может представлять собой различные вариации в зависимости от специфики исследуемого объекта. Применение модульной архитектуры позволяет вводить дополнение в функционал платформы в короткие сроки. Планируется добавление ОРС интерфейса для возможности работы с различными ОРС совместимыми приборами Mitsubishi Electric. Также разрабатывается провайдер для внедрения других баз данных.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Уоссермен Ф. Нейрокомпьютерная техника: Теория и практика / Пер. с англ. Ю.А.Зуева, В.А.Точенова — М.: Мир, 1992.
2. Мкртчян С.О. Нейроны и нейронные сети. (Введение в теорию формальных нейронов) — М.: Энергия, 1971.
3. Э. Троелсен. Язык программирования C# 2010 и платформа .NET 4/ -М.: Издательство «Вильямс», 2010. -1392 с.
4. Интернет: <http://www.mitsubishielectric.ru>, <http://www.mitsubishielectric.com>, <https://www.wikipedia.org>, <http://netkom.by/docs/N31-Nechetskaya-logika.pdf>.

УДК 004.94 - 621.317.373

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДАТЧИКА РАЗНОСТИ ФАЗ ДЛЯ АВТОМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ КОМПЕНСАЦИИ ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Вабищевич Л.И., Ярошевич А.В.

Брестский государственный технический университет,
Брест, Республика Беларусь

В системах автоматической компенсации реактивной мощности сигналом рассогласования для управления коммутацией компенсаторной батареи конденсаторов является угол сдвига фаз напряжения и тока в сети энергопотребления. Датчиком рассогласования служит фазовый детектор.

Применение компенсаторов в сетях бытовых нагрузок [1] предъявляет требования минимальных габаритов, простоты и надёжности элементов системы, в том числе датчиков.

Задача измерения разности фаз может быть решена многими способами. Наиболее простыми схемами реализуется метод, основанный на преобразовании интервала времени в напряжение [2]. Предложено несколько схем реализации фазового детектора с компараторами входных сигналов [3,4]. Рассмотрим детекторы с наиболее простой схемной реализацией.

Самой простой схемой представлен детектор на ограничителях [3]. Характеристику выходного напряжения этой схемы получим с помощью модели, построенной с пакетом Electronics Workbench (EWB). Модель детектора представлена на рисунке 1.

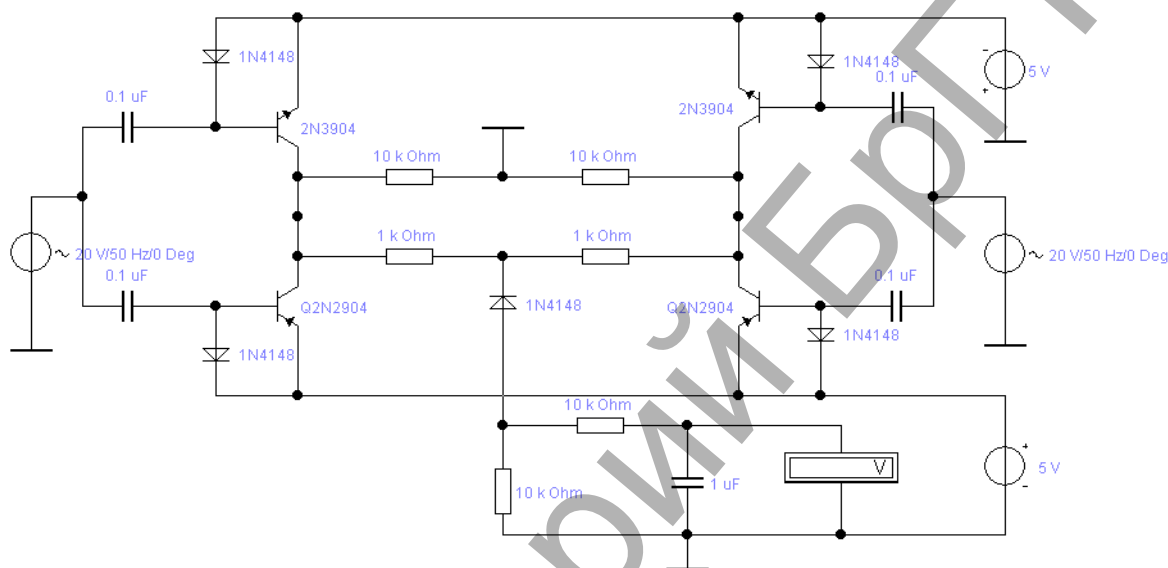


Рисунок 1 – Модель фазового детектора на ограничителях

Моделирование производилось при различных значениях входного напряжения в диапазоне $\Delta\varphi$ от 0 до 100 угловых градусов. Результаты моделирования представлены в Таблице 1 ($u_{\text{вых3}}$) и на графике (рисунок 4, ряд 3).

Таблица 1 – Результаты моделирования фазовых детекторов.

$\Delta\varphi$ град	$u_{\text{вых1}}$ В	$u_{\text{вых2}}$ В	$u_{\text{вых3}}$ В
0	0	0	-1,89
1	-0,012	0,02	-1,9
2	-0,02	0,04	-1,9
5	-0,06	0,14	-1,92
8	-0,1	0,22	-1,94
10	-0,12	0,25	-1,95
20	-0,2	0,52	-1,98
40	-0,52	1,1	-1,94
60	-0,83	1,6	-1,71
80	-1,1	2,25	-1,55
90	-1,25	2,5	-1,45
100	-1,4	2,63	-1,33

Анализ результатов позволяет отметить два основных недостатка этой схемы. Первый - чувствительность невысокая, составляет около 5 мВ/град.

Второй – на углах до 30 градусов схема фактически не реагирует на разность фаз, это конструктивный недостаток схемы, не позволяющий применять её в качестве датчика.

Небольшим по количеству элементов является фазометр[5] на компараторах с транзисторными ключами. Модель фазового детектора представлена на рисунке 2.

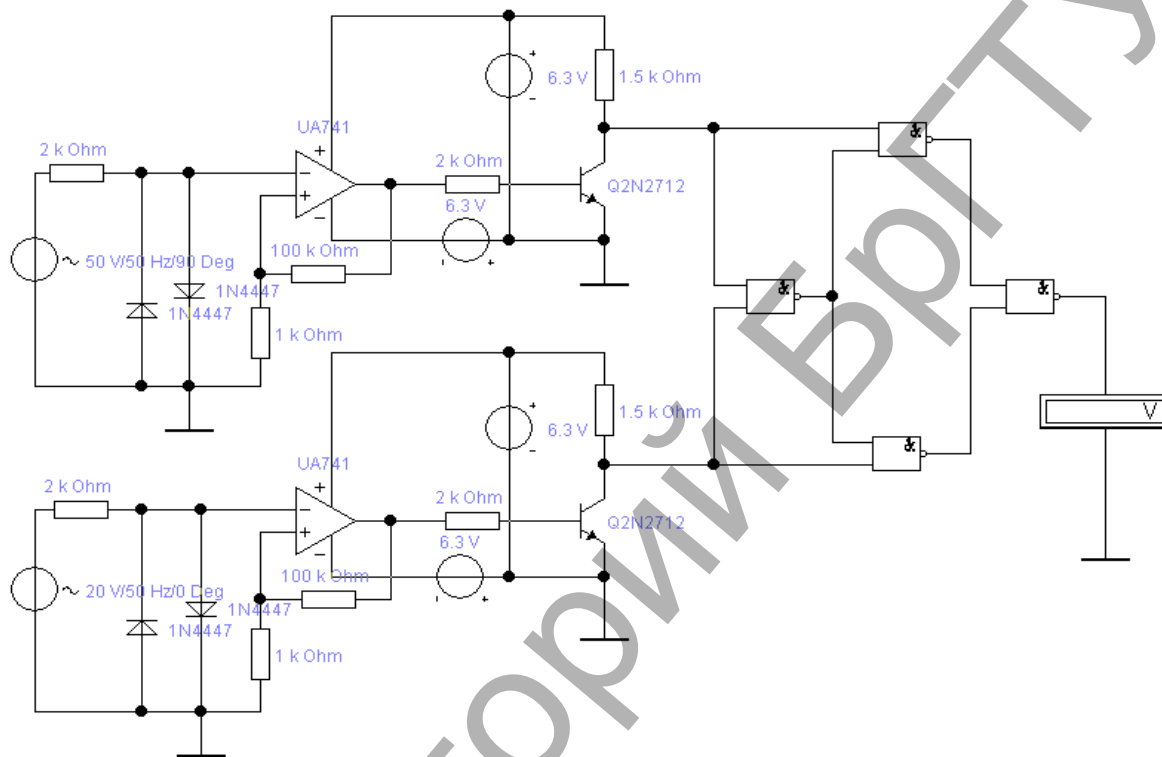


Рисунок 2 – Модель фазового детектора с транзисторными ключами

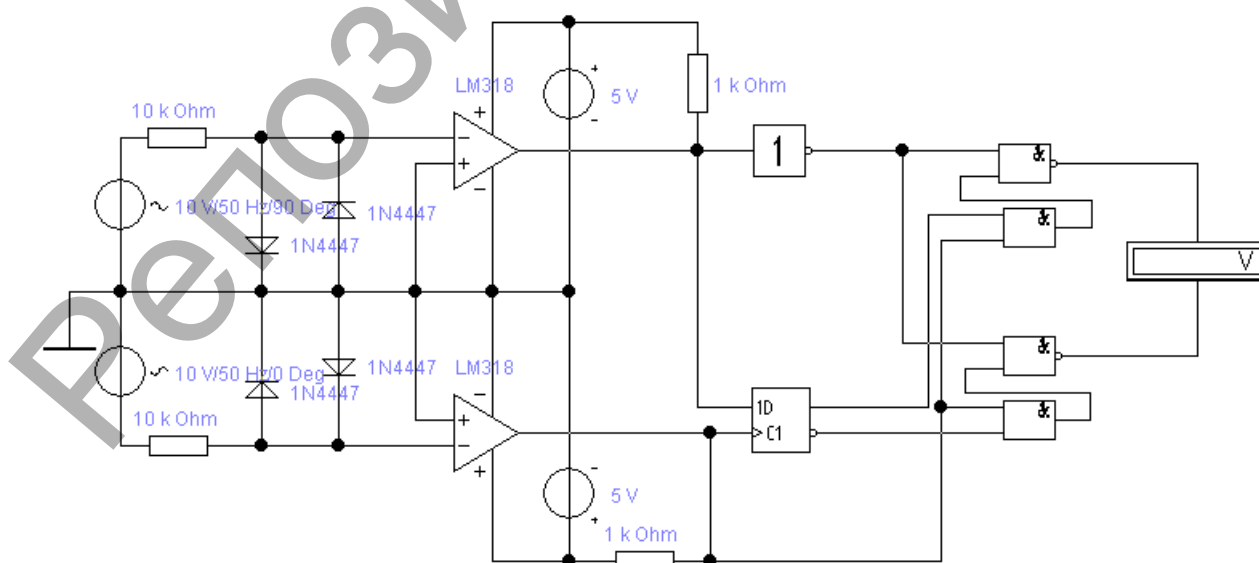


Рисунок 3 – Модель фазометра на компараторах с D – триггером

Результаты моделирования представлены в Таблице 1 ($u_{вых2}$) и на графике (рисунок 4, ряд 2). По сравнению с предыдущей схемой чувствительность прибора значительно выше и составляет около 25 мВ/град. График представляет собой практически линейную зависимость.

Несколько меньшее число элементов требуется для реализации схемы фазометра [8] на компараторах с D – триггером. Модель фазового детектора представлена на рисунке 3.

Результаты моделирования представлены в Таблице 1 ($u_{вых1}$) и на графике (рисунок 4, ряд 1). По сравнению с предыдущей схемой чувствительность прибора ниже и составляет около 15 мВ/град. График представляет обратно пропорциональную практически линейную зависимость.

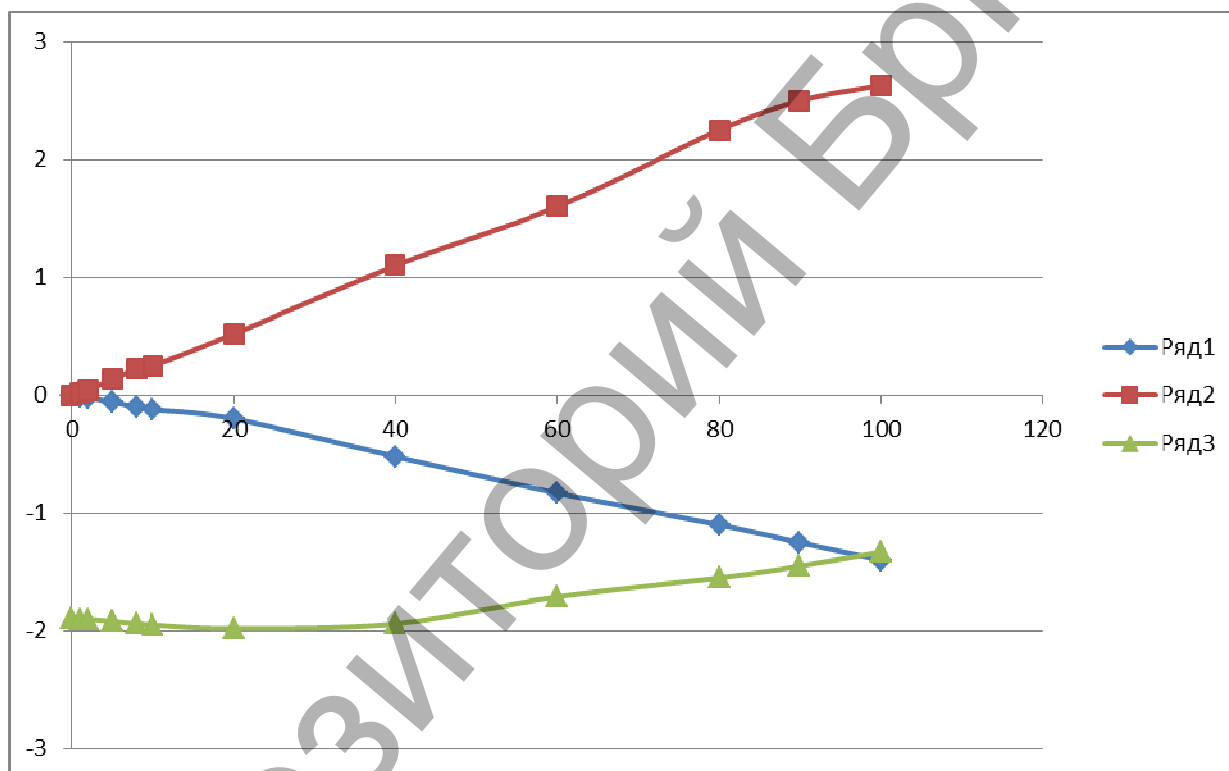


Рисунок 4 – Графики зависимости напряжения на выходе от разности фаз входных сигналов по результатам моделирования фазовых детекторов

Выводы. Анализ результатов моделирования позволяет выбрать схему фазометра на компараторах с транзисторными ключами в качестве датчика рассогласования. 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.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. А.В.Ярошевич. Схема компенсации реактивной мощности в квартирных электрических сетях // Вестник Брестского государственного технического университета - Физика, матема-

тика, информатика. Вып.5(71), / редкол.: А.А.Гладышук и др. – Брест: БрГТУ. 2011. С. 66-67.

2. Клаассен К.Б. Основы измерений. Электронные методы и приборы в измерительной технике. Москва: Постмаркет, 2000. – 352 с.

3. Бутев В. Электронный фазометр//Радио №5. 1990. – С. 56.

4. Горошков Б. И. Радиоэлектронные устройства: Справочник. – М.: Радио и связь, 1984. – 400 с.

5. Гончаренко А. Фазометр на микросхемах.// Радио №12. 1984. – С. 29.

УДК 681.5

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ОБЪЕКТОВ С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

Литвиненко М.А.¹, Клютко М.¹, Карнович Д.С.¹, Лихавицкий В.В.¹

1) Белорусский государственный технологический университет,
Минск, Республика Беларусь

Система управления с распределенными параметрами – система управления, состояние которой определяется функциями нескольких независимых переменных, как правило, зависящими не только от времени, но и от пространственных координат. В качестве таких функций могут фигурировать скалярные, векторные, тензорные и другие поля различной физ. природы (поля мех. напряжений и деформаций, поля температуры, концентраций, электромагнитные поля и др.). Эти поля отображают процессы в упругих телах, жидких, газообразных и плазменных средах, в различных объектах химической технологии, металлургии, теплоэнергетики, экспериментальной физики, в транспортных средствах и т.д.

Для математического описания систем управления с распределенными параметрами обычно применяют дифференциальные уравнения в частных производных (ДУЧП) с соответствующими краевыми условиями, условиями нормировки или иными дополнительными условиями, выделяющими определенные решения. Используются также интегральные, интегро-дифференциальные и некоторые др. типы уравнений с несколькими независимыми переменными.

В простейших случаях лишь одно или несколько отдельных звеньев систем управления с распределенными параметрами имеют распределенные, а остальные – сосредоточенные параметры. Примером систем управления с распределенными параметрами может служить система управления тепловым режимом проходной печи.

Принцип действия которой состоит в следующем: продвигаясь через зону нагрева, изделия (объект управления) нагреваются. Режим нагрева зависит от интенсивности горения и скорости продвижения изделий через печь. Управляющее устройство, используя сигналы датчиков температуры, управляет режимом нагрева в соответствии с требованиями технологии путем воздействия на регулирующий орган подачи топлива, форсунку и механизм транспортировки изделий.

Назначение описанной системы состоит в том, чтобы обеспечить распределение температуры изделий на выходе печи по толщине и во времени нагрева, наименее отклоняющееся от заданного распределения T_{out} . В качестве меры отклонения регулируемого процесса от желаемого часто принимается функционал

$$J = \left\{ \frac{1}{\tau S} \int_0^{\tau} \int_0^S [T(x, L, t) - T_{out}(x, t)]^2 dx dt \right\}^{\frac{1}{2}}.$$

Процесс теплообмена в объекте описывается уравнением в частных производных

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - bv \frac{\partial T}{\partial y},$$

где a – коэффициент температуропроводности, $b(y, t)$ – функция, определяемая теплофизическими параметрами объекта, v – скорость перемещения изделий. Начальное и граничные условия имеют вид

$$T(x, y, 0) = T_0(x, y), \quad \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} = 0;$$

$$\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=S} = \alpha [U(y, t) - T(S, y, t)].$$

Здесь $T_0(x, y)$ – начальное распределение температуры, λ – коэффициент теплопроводности, α – коэффициент теплообмена, $U(y, t)$ – температура греющей среды внутри печи. Управляющее воздействие и поле состояния объекта подчиняются неравенствам, учитывающим энергетические возможности и условия технологии

$$A_1 \leq U(y, t) \leq A_2, \quad \left| \frac{\partial U}{\partial y} \right| \leq A_3,$$

$$T(x, y, t) \leq A_4, \quad \left| \frac{\partial T}{\partial x} \right| \leq A_5,$$

где A_1 - A_5 – некоторые заданные постоянные или переменные величины. Приведенная система уравнений и граничных условий – типична для многих процессов, напр., диффузионных, электромагнитных (скин-эффект) и др.

При классификации систем управления с распределенными параметрами используют следующие основные признаки:

I. Функциональные признаки: 1) роль звена в управляющем устройстве (отдельный элемент, объединение элементов и устройство в целом); 2) назначение (измерение, фильтрация, запоминание, регулирование и т. п.); 3) возможность и способы перестройки (постоянная настройка, ручная, автоматическая и т. п.); 4) число степеней свободы (конечное, счетное и несчетное); 5) динамика (устойчивость, быстродействие, самовыравнивание и разрешающая способность).

II. Геометрические признаки: 1) размерность занимаемого подпространства (0-, 1-, 2- и 3-мерные устройства); 2) внешняя конфигурация устройства (точка, линия, полоса, оболочка, стержень, слой); 3) количество и размерность многообразий контакта данного устройства со смежными; 4) направленность действия (директор, отражатель, распределитель и т. д.).

III. Признаки внутренней структуры: 1) характер пространственного распределения параметров (устройства с дискретной структурой, квазиконтинуальные и континуальные); 2) разновидность микроструктуры (для квазиконтинуальных устройств).

IV. Физические признаки: 1) применяемые виды энергии; 2) механизм усиления; 3) поля состояния и взаимодействия; 4) количественные характеристики сред (параметры, тензоры, операторы); 5) дисперсионные характеристики; 6) применяемые материалы и среды.

Возможны три основных способа формирования пространственной передаточной функции распределенных управляющих устройств: а) применение слоистых сред с параметрами, изменяющимися в направлении нормали к поверхностям уровня; б) построение набора ортогонализированных подсистем, взаимодействующих с определенными пространственными гармониками поля, и в) использование искусственных сред периодически волокнистой структуры типа управляющих кристаллов. Такие среды удобны для реализации дисперсионных характеристик, подобных характеристикам управляемых объектов с несколькими ветвями неустойчивостей, напр., плазма, пучки заряженных частиц и т. п. Аппарат исследования преобразования полей в системе управления с распределенными параметрами обладающих симметрией (напр., периодической структурой), основан на линейной представлений групп теории. Системы управления с распределенными параметрами применяют для управления проходными печами, прокатными станами, подъемными механизмами, газопроводами, ядерными реакторами, ускорителями заряженных частиц, термоядерными установками и др.

УДК 652.52

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СУШКИ В БАРАБАННЫХ СУШИЛКАХ, КАК ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ

Кобринец В. П., Пронин Д. Н.

Белорусский государственный технологический университет
Минск, Республика Беларусь

Процесс сушки концентрата КС1 в условиях ОАО «Беларуськалий» производится в барабанной сушилке, которая состоит из трёх основных частей: топки, в которой происходит сгорание топлива (газа) за счет подачи первичного воздуха; смесительной камеры, в которой смешиваются подаваемые в неё топочные газы и вторичный воздух и формируется теплоноситель с определенной темпе-

ратурой и влагосодержанием; сушильного барабана, где теплоноситель, взаимодействуя с высушиваемым материалом, отнимает у него влагу.

Основные цели системы управления процессом сушки материала в барабанной сушилке:

1. Поддержание желаемого качества высушенного продукта, независимо от возмущения в процессе сушки и колебания подачи питания.

2. Максимизация пропускной способности при оптимальной энергетической эффективности и минимуме затрат.

3. Стабилизация процесса сушки.

Прямой контроль и постоянное измерение содержания влаги в твердых материалах позволит получить значительные улучшения при контроле сушилки, обеспечивая немедленные измерения содержания влаги на выходе сушилки и автоматическую компенсацию факторов, которые нарушают работу управления.

Первым этапом синтеза системы управления процессом сушки является разработка математической модели данного процесса по основным каналам управления.

Процессы тепло- и массообмена (влагообмена) в барабанной сушилке зависят от ее конструктивных характеристик (размеров, числа и профиля лопаток и т. д.), а также от технологических параметров (числа оборотов барабана, угла наклона аппарата, расхода, температуры и влагосодержания теплоносителя и материала на входе в сушилку). При определении динамических свойств данного аппарата естественно считать его конструктивные характеристики неизменными. Таким образом, в качестве возмущающих воздействий (входных величин) принимаем изменения расхода, температуры и влагосодержания материала и теплоносителя на входе в сушилку.

При составлении математической модели барабанной сушилки сделаем следующие допущения: [1]

1. Теплоемкости материала, влаги (воды) и барабана и коэффициенты теплоотдачи от теплоносителя к материалу и барабану постоянны по длине и в поперечном сечении сушилки, а также во времени.

2. Температура и влагосодержание материала распределены по длине аппарата и сосредоточены в его поперечном сечении (одномерная задача), так как при вращении барабана материал хорошо смешивается.

3. Скорость теплоносителя намного больше скорости перемещения материала вдоль сушилки. Поэтому температура и влагосодержание теплоносителя одинаковы по длине и в поперечном сечении слоя материала и равны температуре и влагосодержанию на выходе.

4. Передачей тепла материалу при соприкосновении его с лопастями барабана пренебрегаем.

5. Движение материала по сечению аппарата происходит равномерно, без турбулентного перемешивания.

При составлении уравнений сохранения энергии для теплоносителя и материала учитывается лишь тепло, затраченное на нагрев «сухого» материала, по-

сколькx тепло переданное теплоносителем материала и затраченное на испарение влаги из него возвращается обратно в теплоноситель вместе с испаренной влагой.

На основании анализа процесса сушки как объекта управления можно определить воздействия, оказывающие влияние на данный объект:

- возмущающие воздействия: входное влагосодержание материала; расход материала; входное влагосодержание и температура теплоносителя;
- регулирующее воздействие: расход теплоносителя;
- регулируемая величина: выходное влагосодержание материала.

Для разработки математической модели процесса сушки с учетом распределенности параметров и приведенных допущений составляем следующие дифференциальные уравнения:

Уравнение сохранения энергии для теплоносителя на входе и на выходе сушилки

$$LI_1 - LI_2 - \alpha_{f,г.м} F_M \left(t_{2г} - \frac{t_{1м} - t_{2м}}{2} \right) - \alpha_{f,г.б} F_б (t_{2г} - t_б) = M_r \frac{dt_2}{dt} \quad (1)$$

Уравнение сохранения массы для влаги в теплоносителе

$$L(d_1 - d_2) + G(w_1 - w_2) = M_r \frac{dd_2}{dt} \quad (2)$$

Уравнение сохранения энергии для материала

$$c_m G \frac{\partial t_m}{\partial y} + c_m t_m \frac{\partial G}{\partial y} - \alpha_{f,г.м} F_M (t_{2г} - t_m) + \frac{\partial}{\partial t} (c_m M_m t_m) = 0 \quad (3)$$

Уравнение сохранения массы для сухого материала

$$\frac{\partial G}{\partial y} + \frac{\partial M_m}{\partial t} = 0 \quad (4)$$

Уравнение сохранения массы для влаги в материале

$$G \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial G}{\partial y} + K F_M (w - w_{равн.}) + \frac{\partial}{\partial t} (M_m w) = 0 \quad (5)$$

Уравнение сохранения энергии для сушильного барабана

$$\alpha_{f,г.б} F_б (t_{2г} - t_б) = c_б M_б \frac{dt_б}{dt} \quad (6)$$

где L – расход теплоносителя (по абсолютно сухому веществу), I – энтальпия, α_f – поверхностный коэффициент теплообмена, F – площадь, t – температура, M – количество вещества, d – влагосодержание теплоносителя, G – расход материала (по абсолютно сухому веществу), c – истинная теплоемкость, K – коэффициент сушки; w – влагосодержание высушиваемого материала на вес абсолютно сухого вещества; $w_{равн.}$ – равновесное влагосодержание материала; $\bar{y} = y/L$; L – длина аппарата; y – текущая координата; индексы: г – газ, м – материал, б – сушильный барабан; 1 – вход в сушилку, 2 – выход из сушилки.

На основании данных уравнений получена система нелинейных уравнений в частных производных. Проведена линеаризация данной системы и получена математическая модель процесса сушки по основным динамическим каналам:

$$a_1 \frac{d\Delta t_{2\tau}}{d\tau} + a_2 \Delta t_{2\tau} + a_3 \frac{d\mu_{2d}}{d\tau} + a_4 \mu_{2d} - a_5 \Delta t_{1\tau} + a_6 \Delta t_{1\tau} + a_6 \mu_L + a_7 \Delta t_{1M} + a_7 \Delta t_{2M} + a_8 \Delta t_6 + a_9 \mu_{1d} + a_{10} \mu_{F,M} \quad (7)$$

$$a_{11} \frac{d\mu_{2d}}{d\tau} + a_{12} \mu_{2d} = a_{13} \mu_{1d} + a_{14} \mu_{1w} + a_{15} \mu_L - a_{14} \mu_{2w} + a_{16} \mu_G \quad (8)$$

$$a_{17} \frac{\partial \Delta t_M}{\partial \bar{y}} + a_{18} \frac{\partial \Delta t_M}{\partial \tau} + a_{19} \Delta t_M = a_{19} \Delta t_{2\tau} + a_{20} \mu_{F,M} + a_{21} \frac{\partial \mu_{M,M}}{\partial \tau} + a_{22} \frac{\partial \mu_G}{\partial \bar{y}} \quad (9)$$

$$\frac{\partial \mu_G}{\partial \bar{y}} + a_{23} \frac{\partial \mu_G}{\partial \tau} = 0 \quad (10)$$

$$a_{24} \frac{\partial \mu_w}{\partial \tau} + a_{25} \frac{\partial \mu_w}{\partial \bar{y}} + a_{26} \mu_w + [a_{27} \exp(-a_0 \bar{y}) + a_{28}] \mu_{2d} + [a_{29} \exp(-a_0 \bar{y}) + a_{30}] \Delta t_{2\tau} + [a_{31} \exp(-a_0 \bar{y}) + a_{32}] \frac{\partial \mu_G}{\partial \tau} + a_{33} \exp(-a_0 \bar{y}) \mu_L + [a_{34} \exp(-a_0 \bar{y}) + a_{35}] \frac{\partial \mu_G}{\partial \bar{y}} + [a_{36} \exp(-a_0 \bar{y}) + a_{39}] \mu_G = 0 \quad (11)$$

$$a_{38} \frac{d\Delta t_6}{d\tau} + a_{39} \Delta t_6 = a_{39} \Delta t_{2\tau} \quad (12)$$

где a_i – коэффициенты системы уравнений, которые являются функциями параметров, входящих в исходные уравнения (1-6); Δt – малые приращения переменных; μ – относительные изменения переменных.

Однозначность решения системы уравнений (7-12) зададим краевыми условиями

$$\text{При } y = 0 \quad \mu_w = \mu_{1w} \quad \Delta t_M = \Delta t_{1M} \mu_G = \mu_{1G}$$

$$\text{При } \tau = 0 \quad \Delta t_{2\tau} = \mu_{2d} = \Delta t_M = \mu_G = \mu_w = \Delta t_6 = 0$$

Применяя к уравнениям (7-12) преобразование Лапласа $\varphi(p) = L[F(\tau)]$ и $\varphi(s) = L[F(\bar{y})]$ и одно обратное преобразование $F(y) = L^{-1}[\varphi(s)]$ можно получить передаточные функции по каналам, приведенным на структурной схеме (рисунок 1).

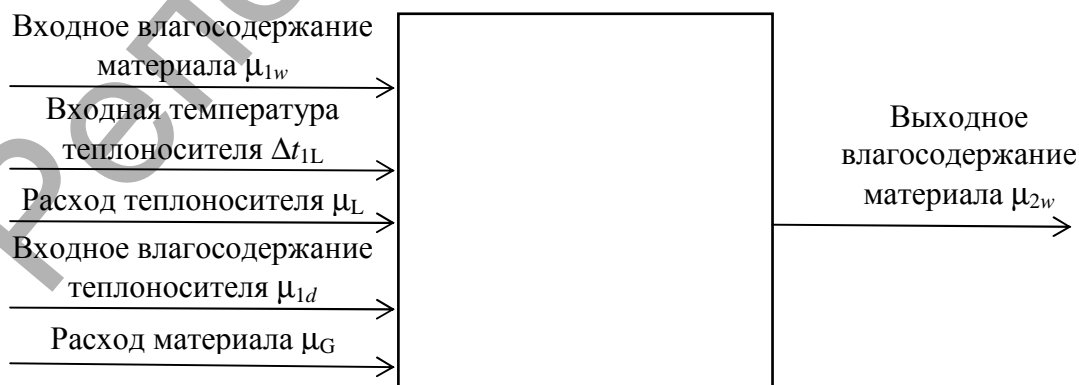


Рисунок 1 Структурная схема сушилки

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Баумштейн И.П. Автоматизация процессов сушки в химической промышленности / И.П. Баумштейн, Ю.Н. Майзель – М.: Химия, 1970 – 232 с.

УДК 68(075.8)

ПОДХОД К МОДЕЛИРОВАНИЮ СИСТЕМ С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

Гринюк Д.А., Сухорукова И.Г., Марозова М.П., Оробей И.О.
Белорусский государственный технологический университет,
г. Минск, Республика Беларусь

Модели большого числа самых различных объектов управления могут быть с достаточной для практических целей точностью отнесены к классу системами с сосредоточенными параметрами (ССП).

Общей особенностью СПП является описание управляемых процессов в терминах величин, не отражающих в явной форме влияние пространственной протяженности объекта на его характеристики. Поскольку на практике любой технический объект управления имеет вполне определенные геометрические размеры, то функция, характеризующая его состояние, вообще говоря, изменяется в пределах пространственной области, занимаемой объектом, и, следовательно, зависит не только от времени, но и от вектора x пространственных координат, являясь функцией $Q(x, t)$ по меньшей мере двух аргументов (если x – скалярная переменная).

Если зависимость Q от x пренебрежимо мала, то такой объект можно отнести к типу СПП. В противном случае этого нельзя сделать без существенных погрешностей в описании управляемых процессов или даже без потери их качественных особенностей. Системы, состояние которых описывается функциями нескольких аргументов, зависящими как от времени, так и от пространственных координат, получили название систем с распределенными параметрами (СРП), или, короче, распределенных систем.

Строго говоря, практически любой реальный объект управления представляет собой СРП, и лишь в частных (хотя и достаточно часто встречающихся на практике) случаях его можно с некоторыми допущениями и погрешностями отнести к типу СПП. Необозримое по своему разнообразию число реальных управляемых процессов, описываемых пространственно-временными характеристиками физических полей различной природы (электромагнитное и температурное поля, поля концентраций, перемещений, деформаций, напряжений, скоростей, давлений, потенциалов и т.д.), относится к "собственно" СРП, для которых пренебрежение пространственной зависимостью функции состояния приводит к потере принципиальных свойств объекта и следовательно, становится невозможным.

Задачи управления СРП оказываются качественно более сложными по сравнению с СПП ввиду целого ряда принципиальных особенностей [1].

1. Состояние СРП, определяемое функцией нескольких переменных, описывается, соответственно, дифференциальными уравнениями не в обыкновенных,

а в частных производных, интегральными уравнениями, а также "гибридными" системами уравнений различной природы, включая в качестве дополнительных соотношений и обыкновенные дифференциальные уравнения.

2. По сравнению с ССП принципиально расширяется класс управляющих воздействий.

3. Формулируемые применительно к пространственно-распределенным функциям состояния и управляющим воздействиям в СРП даже традиционные в содержательном плане постановки задач управления характеризуются рядом отличий, не имеющих аналогов в задачах управления ССП.

4. Указанные выше особенности приводят к необходимости далеко не тривиальных обобщений важнейших категорий теории управления на случай систем с распределенными параметрами и по существу требуют создания нового аппарата для их анализа и синтеза на базе нетрадиционных для теории управления математических средств.

5. Задача реализации систем управления объектами с распределенными параметрами резко усложняется по сравнению с ССП как за счет необходимости осуществления пространственно-распределенного контроля состояния объекта в целях наблюдения за результатами процесса управления и использования соответствующих сигналов обратных связей, так и за счет необходимости построения регуляторов с пространственно-распределенными управляющими воздействиями.

Одной из удобных, с практической точки зрения, по пути решения задач управления, является использование моделирования систем с распределенными параметрами.

В наиболее простых ситуациях, допускающих представление объектов с распределенными параметрами в форме "элементарных" линейных распределенных блоков с известными вход-выходными соотношениями, системы с распределенными параметрами описываются точными математическими моделями достаточно сложного ввода. При этом типичным следствием моделирования поведения ОРП дифференциальными уравнениями в частных производных является трансцендентный характер зависимости соответствующих передаточных функций от комплексной переменной (либо описание этой зависимости в форме бесконечных рядов) даже относительно сосредоточенных входных воздействий, что резко усложняет их анализ и использование в целях последующего синтеза систем управления по сравнению с дробно-рациональными передаточными функциями систем с ССП. В более сложных случаях, например, для пространственно-многомерных объектов со сложной формой границы области изменения пространственных координат или при необходимости учитывать существенные нелинейные эффекты, как правило, вообще не удается получить аналитическое решение уравнений объекта. Указанные обстоятельства привели к широкому распространению на практике приближенных моделей ОРП упрощенного вида, описывающих их поведение с требуемой точностью.

При этом преобладающей тенденцией является вполне понятное стремление к построению таких моделей в форме соответствующих ССП, что, во-первых,

диктуется "физически прозрачными" соображениями о возможности описания СРП с любой желаемой точностью правильно подобранной более простой ССП и, во-вторых, возможностью применения после такой аппроксимации всего "привычного" фундаментального аппарата теории управления ССП.

Сразу отметим, что всюду в данной главе имеются в виду аналитические методы получения искомым приближений по известным точным описаниям рассматриваемых распределенных блоков. В инженерной практике широко распространены в этих целях достаточно хорошо разработанные применительно к ССП экспериментальные методы (методы идентификации), которые естественно отнести к способам приближенного моделирования объектов управления.

К очевидным недостаткам экспериментальных методов относится, прежде всего, частный характер получаемых результатов, правомерных лишь применительно к конкретным режимам работы конкретного объекта с конкретными значениями соответствующих параметров.

В настоящее время разработан целый ряд аналитических способов, построения приближенных моделей объектов с распределенными параметрами.

Как известно, современные системы управления строятся на использовании цифровых систем. Управляющие воздействия на объект управления формируются путем прерывания цикла нормального течения вычислительного процесса микропроцессорной структуры. Несмотря на высокое быстродействие современных процессоров, как теория управления, так и энергетические факторы рекомендуют выбирать время цикла (время квантования) исходя из динамических свойств объекта [2, 3].

Данное положение позволяет в некоторых случаях реализовать моделирование системы с распределенных координатами с максимальным приближением.

Наилучшие решения получаются, если имеется аналитическое решение уравнения в частных производных для разомкнутого технологического объекта.

Для получения результатов переходного процесса системы регулирования требуется получать отдельное решение после каждого шага квантования. Т.е. изменилось входное воздействие на объект – считаем динамики объекта на интервале квантования. По результатам расчета вычисляем новые граничные решения и начальные системы. Потом просчитываем показания обратной связи. На основании полученного значения рассчитываем новое значение управляющего воздействия от регулятора. Далее повторяем цикл.

Наличие аналитического решения не является обязательным условием для моделирования динамики СРП по предложенному алгоритму. Решение между циклами квантования можно получать и с применением численных методов решения уравнения в частных производных. Существует большой класс программных продуктов для решения уравнений в частных производных, которые способны произвести расчет за короткое время с удовлетворительной для технических систем точностью. Это может позволить использовать данный подход для реализации, например, систем управления по модели без упрощения уравнения в частных производных до уравнения в обыкновенных производных для широкого класса технологических процессов.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Рапопорт, Э.Я. Структурное моделирование объектов и систем управления с распределенными параметрами: Учеб. пособие/Э.Я. Рапопорт. — М.: Высш. шк., 2003. — 299 с.
2. Изерман, Р. Цифровые системы управления : пер. с англ. / Р. Изерман. — М. : Мир, 1984. — 541 с.
3. Гринюк Д.А. Цифровые алгоритмы для управления технологическими процессами. / Д.А. Гринюк, И.О. Оробей, И.Г. Сухорукова, Н.М. Олиферович // МНТК «Информационные технологии и системы 2013 (ИТС 2013)», Минск, – Минск: БГУИР, 2013 – С.38-39.

УДК531.3; 796.01

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ В РОБОТОТЕХНИКЕ И БИОМЕХАНИКЕ

Покатилов А.Е., Куркор М.А., Ильенков И.В.

Могилевский государственный университет продовольствия,
Могилев, Республика Беларусь.

При исследовании роботов, манипуляторов и в сходных задачах биомеханики движения человека широко используют теорию углового поворота движения твердого тела. Ее основные результаты были получены еще в позапрошлом веке и в 20-м веке серьезно развиты на практике применительно к проблемам техники. Для описания движения твердого тела около неподвижной точки предложены параметры Родрига – Гамильтона, параметры Кейли – Клейна, углы Эйлера – Крылова и направляющие косинусы. Значительную роль сыграла теория гироскопов. При этом движение твердого тела задавалось исключительно углами Эйлера – Крылова, которые нашли широкое применение во всех работах по механике, включая и работы по исследованию управления движущимися объектами [1]. В конце 20-го появлялись серьезные научные исследования в области манипуляторов по использованию алгебры кватернионов для описания движения роботов [2], но они имели больше академический, а не практический интерес.

Анализ состояния исследований в области изучения пространственного движения роботов, и сходных по структуре биомеханических систем (БМС), выявил серьезную проблему в описании пространственного движения кинематических цепей, подобных опорно-двигательному аппарату человека. В настоящее время задачи пространственного движения человека решаются в кинематографе, анимации и компьютерных играх для визуализации. Критичным для таких задач является скорость вычислительных операций компьютера по пересчету изображения человека и пр., которая зависит от объема таких операций. Поэтому на первый план выходят технологии, дающие максимальную скорость расчета по сравнению с остальными методами. Среди всех кинематических параметров особое место занимают параметры Родрига – Гамильтона и Кейли – Клейна, т.к. эти параметры не вырождаются при любом положении твердого тела, в отличие от углов Эйлера, и их число равно четырем, поэтому они имеют одно уравнение связи, в отличие от шести для направляющих косинусов. Кроме того, интегрирование кинематических уравнений и преобразование координат в

углах Эйлера – Крылова связаны с тригонометрическими операциями, что резко снижает эффективность применения компьютеров.

Отметим, что, как и в классической механике, в биомеханике управляемого тела выделяют два направления: анализ и синтез движения биологических систем. Каждое из направлений имеет свои особенности, но их общей чертой является трудоемкость биомеханических расчетов, выполнение которых без использования вычислительной техники зачастую невозможно. Кроме этого, применение компьютеров вызывает необходимость разработки моделей движения на кинематическом и динамическом уровнях с учетом универсального характера создаваемых программ анализа и синтеза. Такие программы не должны зависеть от условия конкретной задачи, а сами определять стратегию расчета по исходным данным.

Кроме выбора и использования определенного математического аппарата для исследования пространственного движения кинематических цепей, подобных опорно-двигательному аппарату человека, стоит задача развития экспериментальных методов изучения такого движения. В последние годы стала представлять интерес с научной точки зрения такая технология как технология захвата движения (motion capture), получившая широчайшее развитие в смежных с робототехникой и биомеханикой областях, например, в кинематографе, телевидении, в компьютерной анимации и пр.

На сегодняшний день существует множество способов и технологий захвата движения, но их можно разделить на два основных вида:

1. Маркерные системы (оптически пассивные системы, оптически активные системы, магнитные системы, механические системы, гироскопические и инертные сенсоры).

2. Безмаркерные технологии (захват движения методом компьютерного зрения).

В маркерных системах motion capture используется специальное оборудование. На человека надевается костюм с датчиками, он производит движения; данные с датчиков фиксируются камерами и поступают в компьютер, где сводятся в единую трёхмерную модель.

Виды маркерных систем:

1. Оптически пассивные.

На костюме, входящем в комплект такой системы, прикреплены датчики-маркеры, которые названы пассивными, потому что отражают только посланный на них свет, но сами не светятся. В таких системах свет (инфракрасный) на маркеры посылается с установленных на камерах высокочастотных стробоскопов и, отразившись от маркеров, попадает обратно в объектив камеры, сообщая тем самым позицию маркера.

2. Оптически активные.

Вместо светоотражающих маркеров, которые крепятся к костюму актёра, в них используются светодиоды с интегрированными процессорами и радиосинхронизацией. Каждому светодиоду назначается ID (идентификатор), что позволяет системе не путать маркеры друг с другом, а также узнавать их, после

того как они были перекрыты и снова появились в поле зрения камер. Во всём остальном принцип работы таких систем схож с пассивными системами.

3. Магнитные системы.

Маркеры – магниты, а камеры – ресиверы, система высчитывает их позиции по искажениям магнитного потока.

4. Механические системы.

Напрямую следят за сгибами суставов, для этого на актёра надевается специальный механический тосар-скелет, который повторяет следом за ним все движения. В компьютер при этом передаются данные об углах сгибов всех суставов.

5. Гироскопические / инертные.

Используют миниатюрные гироскопы и инертные сенсоры, расположенные на теле актёра – также, как и маркеры или магниты в других тосар-системах. Данные с гироскопов и сенсоров передаются в компьютер, где происходит их обработка и запись. Система определяет не только положение сенсора, но также угол его наклона.

В настоящее время в биомеханике используется технология, подобная технологии с оптически пассивной маркерной системой, но перспективной является безмаркерная технология захвата движения. Данный метод не требует специальных датчиков или специального костюма.

Он основан на технологиях компьютерного зрения и распознавания образов. Человек может сниматься в обычной одежде, что сильно ускоряет подготовку к съемкам и позволяет снимать сложные движения (борьба, падения, прыжки, и т. п.) без риска повреждения датчиков или маркеров. Исследования подобной технологии проводятся на протяжении ряда последних лет.

Примером программного обеспечения, которое используется при захвате движения, является проект фирмы iPi Soft.

Особенности этой безмаркерной технологии:

- удобное использование для аниматоров и переносная система motion capture;
- низкие цены в сравнении с маркерными системами захвата движения;
- не используются маркеры;
- съемка со сложными фонами.

Наиболее полные данные о движении

предоставляет так называемая векторная модель тела человека, которая представляет собой формализованные соотношения между основными узлами тела человека (рисунок 1), данные о координатах этих узлов относительно друг дру-

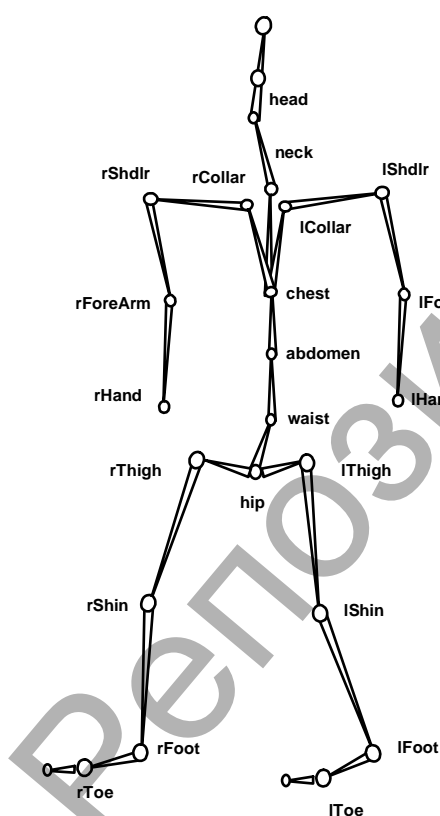


Рисунок 1 – Кинематическая схема БМС

га и окружающего пространства с учетом основных антропометрических характеристик.

Распознанное движение объекта реального мира необходимо для построения на его основе анимации, повторяющей основные движения оригинала, для создания различного рода симуляторов и тренажеров.

Данные о движении предоставляются в виде иерархии основных узлов скелета человека [3], где вращение одних суставов относительно других представлено в виде кватернионов (роль вращающихся векторов выполняют кости скелета), а смещение представлено в виде трехмерных векторов в локальной для каждого узла системе координат.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Бранец, В. Н. Применение кватернионов в задачах ориентации твердого тела / В. Н. Бранец, И. П. Шмыгалевский. – М. ; Главная редакция физико-математической литературы: Наука, 1973. – 320 с.
2. Борисенко, Л. А. Манипуляторы. Механика поворотов / А. Борисенко. – Минск: Вышэйшая школа, 2001. – 100 с.
3. Развитие системы автоматизированного определения эмоций и возможные сферы применения / А.В. Заболевая-Зотова, Ю.А. Орлова, В.Л. Розалиев, А.С. Бобков // Открытое образование. – 2011. – № 2. – С. 59–62.

УДК531.3; 621.8; 796.01

КОМПЬЮТЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ РАСЧЕТА КИНЕМАТИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

Покатилов А.Е., Куркор М.А.

Могилевский государственный университет продовольствия,
Могилев, Республика Беларусь.

Так как в робототехнике моделируются рабочие функции человека, то при расчетах манипуляторов и решении задач биомеханики движения человека часто общей основой является анализ опорно-двигательного аппарата человека. Последний, с точки зрения теории механизмов и машин, представляет собой кинематическую цепь. Методы расчета таких цепей в механике разработаны, но они имеют ту особенность, что предусматривают ручной труд. Сами расчетные методы универсальны, но их применение носит каждый раз конкретный характер, так как методы используются для кинематической цепи с определенным числом звеньев, кинематических пар 5-го, 4-го и 3-го классов. Таким образом, в зависимости от задачи количество звеньев меняется. В качестве наиболее общего случая начнем анализ опорно-двигательного аппарата человека с пространственной схемы. В связи со сложным строением, а значит, и соответственно сложным движением в суставе, для него вводят допущение, по которому каждый сустав биомеханической системы моделируют шарниром.

Известно, что скелет человека состоит из 206 костей, при этом 170 из них парные и 36 непарные, но в движении участвуют только 148 из них [1]. Рассчитаем степень свободы пространственной кинематической цепи по формуле Сомова–Малышева:

$$W = 6n - \sum_{i=1}^5 ip_i \quad (1)$$

где n – число подвижных звеньев кинематической цепи;

p_i – число кинематических пар i -го класса.

На рисунке 1 показана расчетная кинематическая схема биомеханической системы (БМС), т.е. опорно-двигательного аппарата человека [2].

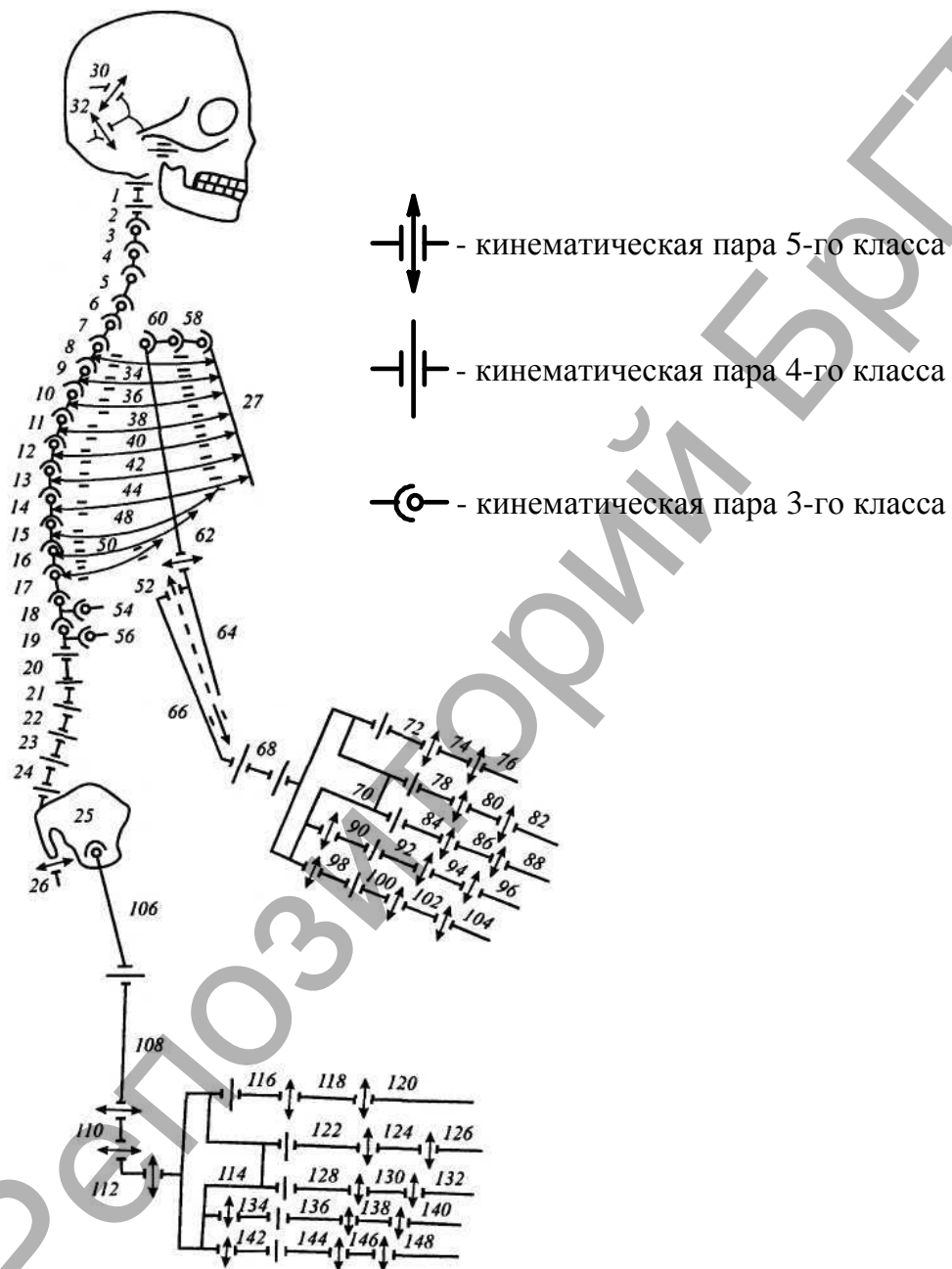


Рисунок 1 – Кинематическая схема опорно-двигательного аппарата

Кости представлены в виде звеньев кинематической цепи, а суставы в виде кинематических пар. Там же на кинематической схеме дана расшифровка обозначений. При расчетах считают, что число подвижных костей (звеньев) в теле

человека равно 148. Число кинематических пар пятого класса $p_5 = 85$, четвертого – $p_4 = 33$ и третьего – $p_3 = 29$.

Число степеней свободы опорно-двигательного аппарата равно [3]

$$W = 6n - \sum_{i=1}^5 iP_i = 6 \cdot 148 - 5 \cdot 85 - 4 \cdot 33 - 3 \cdot 29 = 244. \quad (2)$$

Если показать биомеханическую систему в качестве кинематической цепи, совершающей плоское движение, то по формуле Чебышева для плоских кинематических цепей получим

$$W = 3n - 2p_5 - p_4 = 3 \cdot 148 - 2 \cdot 147 - 0 = 150. \quad (3)$$

Здесь принято следующее число кинематических пар соответствующего класса: $p_5 = 147$, $p_4 = 0$.

Если же не учитывать деление тела на левую и правую половины, а также считать, что во время выполнения упражнения спортсмен молчит, т.е. не работают пары 30-33, а также не учитывать дыхательные движения, то подвижность биомеханической системы уменьшится примерно наполовину. При этом будет разумным не рассматривать и движение копчика – пара 26. Но рассчитать кинематическую цепь даже при $W=75$ представляет собой сложнейшую и очень трудоемкую задачу.

Рядом проведенных исследований показано, что на примере трехзвенной модели биомеханической системы можно вывести все основные закономерности движения [4]. Во-первых, при этом получают необходимые уравнения движения, описывающие многие конкретные случаи движения. Так, большинство оборотов упражнений в гимнастике, выполняемых на перекладине, построено на выполнении сгибательно-разгибательных движений в плечевых и тазобедренных суставах [5] и для их формализации достаточно применить трехзвенную модель опорно-двигательного аппарата человека.

Во-вторых, на основе трехзвенной модели можно получить уравнения в компактной форме для многозвенной системы с любым числом звеньев. В гимнастике существует широкий класс движений с использованием сгибательно-разгибательных движений помимо плечевых и тазобедренных суставов. Движения при выполнении ряда спортивных упражнений осуществляются в лучезапястных, локтевых, коленных, голеностопных суставах [4]. В этом случае опорно-двигательный аппарат человека представляют многозвенной моделью.

Используем подход, реализованный в работе [4] для процесса формирования необходимых уравнений с помощью ЭВМ на уровне произвольного количества элементов биомеханической системы, т.е. для любой многозвенной биосистемы. Предлагаемые на его основе модели кинематики и динамики биомеханической системы одинаково применимы как в условиях жесткой, так и упругой опоры.

Любое искомое уравнение для i -го звена сводится к рекуррентному соотношению типа

$$f_i = f_{i-1} + u_i, \quad (4)$$

где f_i – уравнение, описывающее биомеханическое состояние i -го звена;
 f_{i-1} – уравнение, описывающее биомеханическое состояние $(i-1)$ -го звена;
 u_i – свободный параметр, определяемый масс-инерционными характеристиками i -го звена и наложенными кинематическими связями.

Достаточно определить структуры f_{i-1} и u_i , а после этого, используя соотношение (4), выполнить в программе циклические вычисления по i , от $i=1$ до $i=N$. Таким образом, можно автоматизировать процедуру вывода необходимых уравнений для биомеханических систем с произвольным количеством звеньев.

Гипотеза справедлива как для кинематического, так и для динамического анализов. И применима как для задач биомеханики, так и робототехники.

Биомеханическое состояние всей системы определяется через сумму состояний звеньев биомеханической системы. Формула для биомеханической системы в целом имеет вид

$$f_{БМС} = \sum_{i=1}^N f_i \quad (5)$$

где $f_{БМС}$ – уравнение, описывающее биомеханическое состояние опорно-двигательного аппарата человека в целом.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Боянович, Ю. В. Атлас анатомии человека / Ю. В. Боянович, Н. П. Балакирев. – Ростов-на-Дону.; Феникс, Харьков. : Торсинг, 2005. – 734 с.
2. Бегун, П. И. Биомеханика: учеб. для вузов / П. И. Бегун, Ю. А. Шукейло. – СПб. : Политехника, 2000. – 463 с.
3. Бегун, П. И. Моделирование в биомеханике: учеб. пособие / П. И. Бегун, П. Н. Афонин. – М. : Высш. шк., 2004. – 390 с.
4. Загrevский, В. И. Расчетные модели кинематики и динамики биомеханических систем / В. И. Загrevский. – Томск–Могилев. : 1999. – 156 с.
5. Гавердовский, Ю. К. Техника гимнастических упражнений. Популярное учебное пособие / Ю. К. Гавердовский. – М. : Терра-Спорт, 2002. – 512 с.

УДК 629.735

КОНСТРУИРОВАНИЕ МНОГОЦЕЛЕВОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО РОБОТА ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ В ОБЛАСТИ МЕХАТРОНИКИ, РОБОТОТЕХНИКИ И БИОМЕХАНИКИ

Михальков С.Л., Массальский М.И., Ширвель П.И.

Белорусский национальный технический университет

Минск, Республика Беларусь

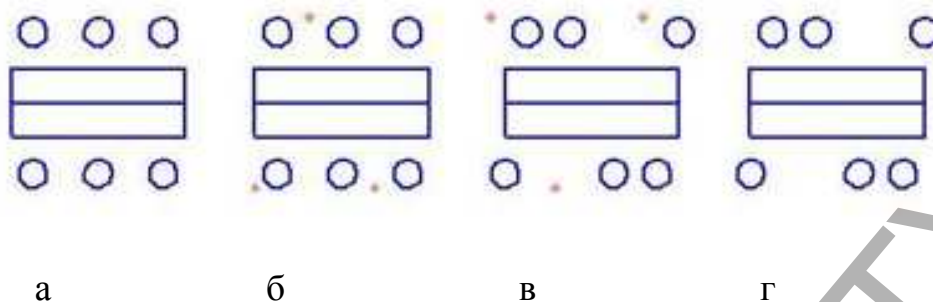
Разработка высокотехнологичного робота в качестве лабораторного комплекса для студентов и преподавателей с целью исследований в области машиностроения, робототехники, мехатроники и биомеханики является весьма актуальной задачей, которая при ее успешном решении позволит вывести образование в сфере робототехники и мехатроники на новый уровень. В настоящее время

робототехника является перспективным направлением в связи с развитием технологий и снижением их стоимости. Особенный рост сейчас наблюдается в сфере образовательной робототехники.

Отметим, что в настоящее время существующие роботы можно условно классифицировать по различным видам движения: колёсные и гусеничные роботы, шагающие роботы, летающие роботы, ползающие роботы, роботы, перемещающиеся по вертикальным поверхностям, плавающие роботы. Подчеркнем, что среди них одним из самых распространённых и универсальных является робот с шагающим видом движения. В соответствии с композиционной концепцией построения шагающих роботов низший уровень управления локомотивным процессом может быть представлен как результат коллективной работы независимых замкнутых систем автоматического регулирования (регуляторов). Какие-либо связи между отдельными регуляторами (горизонтальные связи) отсутствуют. Иными словами, шагающий робот как единый автомат может быть представлен композицией некоторого количества элементарных, независимо функционирующих автоматов, а локомотивный процесс результатом совместного действия этих автоматов. Каждый автомат решает свою собственную задачу и таким путем вносит свой вклад в формирование локомотивного процесса. Технику ходьбы шагающих роботов можно разделить по количеству точек опор на две, четыре и шесть. Условием устойчивого равновесия четвероногого робота является требование, чтобы при движении центр тяжести такого робота в любой момент находился в пределах воображаемого треугольника, углами которого являются опорные в настоящий момент конечности. Исходя из этого, был разработан шагающий агрегат на четырех конечностях, алгоритм движения которого был определен таким образом, чтобы при его движении в любой момент времени в воздухе находилась только одна нога, а корпус имел опору одновременно на три точки и сохранял при этом статическую устойчивость.

Отметим, что популярность шестиногих шагающих роботов в значительной степени обусловлена тем, что проблемы обеспечения статической устойчивости движущихся шестиногих аппаратов решаются относительно просто по сравнению с другими конструкциями. Моделью с шестью ногами мы сможем продемонстрировать знаменитую походку "треножником", т. е. с опорой на три ноги, которую используют большинство существ. На следующих рисунках темный кружок означает, что нога устойчиво поставлена на землю и поддерживает вес существа. Светлый кружок означает, что нога поднята и находится в движении. На рисунке 1а показано существо в позиции "стояния". Все ноги опираются о землю. Из положения "стояния" существо решает идти вперед. Для того чтобы сделать шаг, оно поднимает три из своих ног (см. светлые кружки на рисунке 1б), опираясь своим весом на три оставшиеся ноги (темные кружки). Заметьте, что ноги, поддерживающие вес (темные кружки), расположены в форме треножника (треугольника). Такая позиция является устойчивой, и робот не может упасть. На рисунке 1в показано, что три остальные ноги (светлые кружки) могут двигаться и двигаются вперед. На рисунке 1г показан перенос центра тяже-

сти на другие три опоры (тёмные кружки) и движение вперёд свободных ног (белые кружки).



а - исходное положение; б - перенос центра тяжести; в - перенос свободных лап; г - перенос центра тяжести.

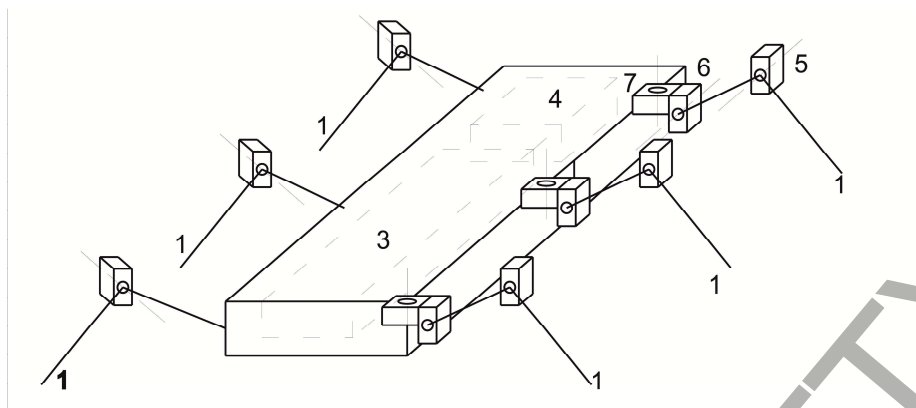
Рисунок 1 – Передвижение шестиногого шагающего робота

Проанализировав строение насекомых (лат. *Insécta*), а также имеющиеся конструкции подобных роботов-гексаподов для создания эскиза робота в ходе проведения работы, было решено опираться на существующий аналог, т.к. он во многом подходил для базовой конструкции, согласно с требованиями, которые были получены при изучении строения насекомых. Каждая нога робота будет иметь по 3 степени свободы. Чтобы обеспечить эту степень подвижности надо устанавливать по одному сервоприводу на каждую степень подвижности. Была рассмотрена возможность оснастить робота ногами, в которых будет по 4 степени свободы и 4 сервопривода, чтобы добавить плавность хода роботу и увеличить гибкость ног при движении. Однако, такой вариант был отклонен в связи увеличением стоимости робота и повышением количества узлов и приводов в роботе, что в свою очередь вызовет уменьшение надежности всей конструкции в целом.

Ноги робота будут крепиться к массивному телу робота, которое будет сделано из двух металлических пластин, жестко соединенных между собой при помощи металлических стоек (грудь без подвижных частей). Такая простая форма груди робота позволяет упростить крепление ног к телу робота, снизить время на ремонт робота при неполадках, а также удешевить его изготовление.

Сперва, началась работа по определению расположения всех электрических компонентов в роботе. Размеры всех компонентов и их технические характеристики были известны. Это значительно упростило работу. В результате работы был создан первоначальный эскиз робота, на который было решено ориентироваться в дальнейшем.

Комплекующие и электрические компоненты робота: сервопривод (SER0019) 18 шт, контроллер сервоприводов (RB-Lyn-850), головной контроллер управления роботом (RB-Lyn-363), аппаратура дистанционного управления (RB-Lyn-899), аккумулятор для питания логической части устройства (GENS ACE 800MAH 2S), аккумулятор для питания силовой части устройства (GENS ACE 3300MAH 2S) по 1 шт.



1 - ходильная нога робота-гексапода с тремя степенями свободы; 2 - грудь робота-гексапода; 3- аккумуляторные батареи робота; 4 - силовая и управляющая электроника; 5, 6, 7 – сервоприводы.

Рисунок 2 – Первоначальный эскиз робота

Основные результаты проекта связаны с мехатроникой и робототехникой. На первом этапе проведен анализ уже имеющихся разработок и создан эскиз робота. На втором – разработана математическая модель, а также трехмерная модель робота-гексапода. На третьем этапе закуплено необходимое навесное оборудование и создано необходимое программное обеспечение. После всех необходимых расчетов изготовлен реальный прототип робота. Стоимость реализованного прототипа составила 450 BYN. На заключительном этапе будут проведены испытания робота-гексапода.

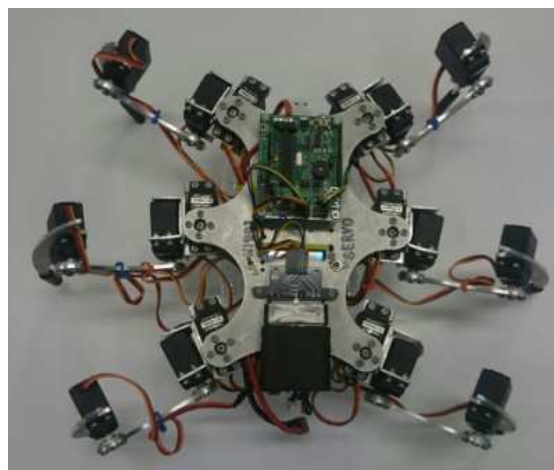


Рисунок 3 – 3D модель робота и сконструированный робот

Научная и практическая значимость заключается в создании лабораторного комплекса, при помощи которого можно будет проводить лабораторные занятия. Все это в совокупности позволит модернизировать учебный процесс, внедрить в процесс образования новые технологии, дать необходимые знания и навыки будущим специалистам по программированию, конструированию и моделированию роботов и устройств.

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

Репозиторий ВРГТУ

РАЗРАБОТКА ОБЪЕКТИВНОГО МЕТОДА КОНТРОЛЯ ВИБРОАКУСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧ

*Антонюк В.Е.¹, Скороходов А.С.¹, Александрова В.С.¹,
Драган А.В.²*

- 1) Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси
Минск, Республика Беларусь
- 2) Брестский государственный технический университет
Брест, Республика Беларусь

Аннотация. Производство коробок передач с низким уровнем шума имеет в настоящее время большое значение, и будет иметь возрастающее значение и в будущем. Одним из условий снижения шума зубчатых колес является необходимость объективного контроля шума зубчатых передач. Первым этапом оценки шума зубчатых колес является их испытание на контрольно-обкатных станках. Контрольно-обкатные станки также используются в технологическом процессе для подбора оптимальных по шуму зубчатых пар.

Состояние вопроса. Наиболее современными контрольно-обкатными станками с ЧПУ для оценки и спектрального анализа шума зубчатых передач являются станок модели Т 60 фирмы Klingelberg и станок TURBO TESTER™ 600 НТТ фирмы Gleason (см. таблицу 1).

Таблица 1 – Контрольно-обкатные станки с ЧПУ

Фирма	Gleason	Klingelberg
Модель станка	TURBO TESTER™ 600НТТ	Т 60
Контролируемые параметры	кинематическая погрешность, монтажное смещение, спектр шума, пятно касания	кинематическая погрешность, монтажное смещение, спектр шума, пятно касания
Наибольший диаметр испытываемых колес, мм	600	500
Частота (тах) вращения ведущей шестерни, мин ⁻¹	3000	5000
Нагружающий крутящий момент (тах) на ведомой шестерне, Нм	90	95
Межосевой угол, градусов	90	90

Эти станки соединяют в себе возможности контрольно-обкатного станка и измерительной машины и позволяют контролировать как уровень и спектр шума, так и кинематическую погрешность передачи (однопрофильный контроль). При этом они имеют высокие обороты ведущей шестерни (до 5000 мин⁻¹), контролируемый нагружающий момент на ведомой шестерни (до 90 Н·м), низкий уровень собственного шума, а также снабжены различными дополнительными устройствами для нанесения краски или специальной смазки и сканирования пятна касания. Кроме того, эти станки имеют обратную связь и включаются в технологическую систему управления качеством изготовления зубчатых колес для внесения необходимых поправок в соответствующие наладки зубообрабатывающих станков.

Постановка задачи. Для создания таких систем обеспечения требуемого качества зубчатых передач необходимо создание современного отечественного контрольно-обкатного станка с ЧПУ. Наиболее близко к созданию такого станка находится белорусское предприятие «ВИЗАС», имеющее опыт создания высокоточных станков с ЧПУ и приборов для контроля зубчатых колес (см. рисунок). Большой опыт в разработке систем двухпрофильного и виброакустического контроля различных типов зубчатых передач имеют специалисты ОИМ, специалисты БрГТУ – в разработке комплексных систем контроля зубчатых приводов, включая измерения и анализ кинематической погрешности.



Рисунок 1 – Прибор двухпрофильного контроля ВЗ 581

Объединив усилия указанных организаций, можно внедрить на белорусских предприятиях предложенную фирмой Klingelberg технологию «замкнутых циклов», которая включает проектирование зубчатой передачи, контроль всех этапов изготовления зубчатых колес, оптимизацию режимов обработки и оптимальную стойкость инструмента, гарантированное достижение требуемого качества зубчатой передачи [1].

Предлагаемое решение. Наиболее простым путем снижения уровня шума зубчатых передач предполагается повышение их точности изготовления, что приводит к повышению их чувствительности к погрешностям изготовления корпусных деталей и монтажа в собранном узле. Поэтому повышение точности изготовления зубчатых колес должно сопровождаться соответствующим повы-

шением точности корпусных деталей, подшипников, базирования зубчатых колес, монтажа и т.д. Но одного повышения точности изготовления зубчатой передачи будет недостаточно для эффективного снижения шума. В конкретном узле зубчатая передача работает с определенными отклонениями от теоретического положения зубчатых венцов, которые происходят из-за допустимой погрешности изготовления, деформаций под нагрузкой, температурных деформаций и т.п.

В то же время современные взгляды на кинематические показатели зубчатых передач позволяют рассматривать ее не только как характеристику точности передачи вращения, но и как комплексный источник диагностической информации о качестве изготовления зубчатых колес и их техническом состоянии, пригодный для эффективного использования при изготовлении и эксплуатации зубчатых приводов. Показатели плавности зубчатых передач, получаемые по данным кинематического контроля, тесно связаны с такими динамическими проявлениями в работе зубчатых передач, как удары и вибрации, что позволяет сформировать требования к уровню качества зубчатых колес. Реализованные к настоящему времени в БрГТУ аппаратно-программные средства [2] позволяют с высокой степенью точности производить снятие информации однопрофильного контроля и виброакустических процессов, возникающих при работе даже многовальных зубчатых приводов.

Существенным вкладом в повышение качества зубчатых колес может быть использование двухпрофильного контроля с записью для каждого зубчатого колеса погрешности измерительного межосевого угла [3]. Анализ записи погрешности при двухпрофильном контроле позволяет выявить ряд характерных погрешностей зубчатого колеса, оказывающих существенное влияние на особенности работы зубчатой передачи – с повышенным шумом, с повышенной вибрацией и т.д. В итоге по характеру записи появляется возможность выявлять зубчатые колеса, которые будут иметь повышенный шум.

Немаловажным вопросом является нормирование уровня шума на основе его статистического анализа при обкатке зубчатых пар до начала эксплуатации, причем на первоначальном этапе нормирование приводится по данным мониторинга ограниченного количества образцов. Далее осуществляется формирование базы данных точности, шума и других параметров выпускаемых зубчатых передач [4]. При этом база данных не является самоцелью, ее основное назначение – обеспечить процесс автоматизированной диагностики качества изготовления и стабильности технологического процесса. Такая функция обеспечивает сканирование собранных в базе данных, идентификацию элементов записей шума, одно- и двухпрофильного контроля с признаками состояния, распознавание состояния объекта, анализ и перечень предполагаемых дефектов.

Заключение. В настоящее время с развитием технических средств измерения, в первую очередь с освоением изготовления средств измерения кинематической погрешности, а также программных средств обработки результатов та-

ких измерений, появилась возможность перейти на новый уровень объективного метода контроля виброакустических характеристик зубчатых передач.

Объективный метод контроля виброакустических характеристик зубчатых передач заключается в том, что производится одновременное измерение и спектральный анализ кинематической погрешности и виброакустических характеристик окончательно собранной зубчатой передачи. Кинематическая погрешность окончательно собранной передачи и ее спектральный анализ позволяют объективно оценить фактическую точность зубчатой передачи. С помощью этого метода возможно выявление большинства погрешностей зубчатой передач – монтажа, изготовления, повреждений.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Dutschk R. Сетевое производство конических зубчатых колес / Симпозиум VDW. 10/11 ноября 2004. Москва. – 2004. – 26 с.,
2. Драган, А.В., Новые аппаратно-программные средства для исследования и диагностики механических систем / А.В. Драган, И.П. Стецко, Д.А. Ромашко, Н.В. Левкович // Вестник Брестского государственного технического университета. – 2006. - №4. – С. 17-26.
3. Русецкий, В.Н. Возможности повышения качества и снижения шума конических зубчатых передач с круговыми зубьями / В.Н. Русецкий, В.Е. Антонок. – Вестник Полоцкого государственного университета. - №8. -2009.- С.101-105
4. Ишин, Н.Н. Назначение предельно допустимых уровней вибраций при диагностике зубчатых механизмов / Н.Н.Ишин, А.М.Гоман, А.С.Скороходов, С.А.Гаврилов // Вісник «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: Проблеми механічного приводу – Х.: НТУ «ХПІ». – 2013. – № 40 . – с. 48-54.

УДК 621.91.002

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДОПУСКОВ ЗВЕНЬЕВ УГЛОВЫХ РАЗМЕРНЫХ ЦЕПЕЙ МАШИН ПРИ НЕПОЛНОЙ ВЗАИМОЗАМЕНЯЕМОСТИ ДЕТАЛЕЙ

Медведев О.А., Олехник М.А.

Брестский государственный технический университет
Брест, Республика Беларусь

Проектирование надежных и точных машин, эффективных техпроцессов сборки невозможно без комплексного размерного анализа объектов проектирования на основе выявления и решения конструкторских размерных цепей. На основе проектных расчетов размерных цепей можно определить технически обоснованные требования к точности размеров комплектующих деталей, исходя из требуемой точности важных функциональных геометрических параметров машины, формирующихся при ее сборке.

Часто проектные расчеты угловых размерных цепей имеют приоритетное значение для обеспечения точности сборки машин, потому что требуемый уровень точности угловых размеров деталей (отклонений от перпендикулярности, параллельности и др.) обычно выше уровня точности линейных размеров и для достижения высокой точности угловых замыкающих размеров при сборке, технически затруднительно использовать методы пригонки и регулирования. Расчеты угловых размерных цепей не находят широкого применения в практике

проектирования машин и техпроцессов. Это объясняется трудностями выявления, восприятия и изображения схем угловых размерных цепей, своеобразием построения системы допусков угловых размеров и отсутствием методики проектных расчетов, пригодной для практики.

Основой проектного расчета любой размерной цепи является способ распределения допуска замыкающего звена на составляющие звенья. По аналогии с линейными размерными цепями для угловых цепей целесообразно использовать способ равноточных допусков, то есть допуски всех составляющих звеньев принимать по одной степени точности, так как бессистемный подбор допусков углов требует больших затрат времени, а принимая равные допуски на угловые размеры при разной длине границ углов, можно получить для углов с длинными сторонами технически и экономически неприемлемый уровень точности. Более рационально допуск на составляющий угловой размер определять с учетом длин его границ, также как допуски на составляющие звенья линейных цепей определяют с учетом их номиналов, ограничивая разнообразие допусков одним квалитетом.

Метод равноточных допусков может быть реализован для угловых размерных цепей при условии, что правила построения стандартной системы угловых допусков, позволяющие получить выражение для расчета номера степени точности (одинаковой для всех составляющих звеньев) в зависимости от допуска замыкающего звена, длин границ углов и параметров системы допусков.

Несмотря на то, что система допусков параллельности, перпендикулярности, наклона, торцевого биения и система допусков углов регламентируется разными стандартами (ГОСТ 24643-81 и ГОСТ 8908-81 соответственно), они построены по единым принципам, имеют одинаковые интервалы длин, набор степеней точности и значений допусков (при выражении допусков углов в линейных единицах в виде катета). Это позволяет использовать метод равноточных допусков для решения размерных цепей, имеющих в качестве составляющих звеньев, как углы, так и отклонения от перпендикулярности, параллельности, торцевого биения и наклона.

Анализ принципов построения указанных систем стандартных допусков позволил составить математическое выражение для расчета любого системного углового допуска, который может быть назначен для j -того звена угловой цепи

$$AT_j = AT_1 \cdot \gamma^{\frac{\ln L_j}{\ln \varepsilon}} \cdot \left(\gamma^{\frac{1}{\ln \varepsilon}} \right)^{\ln L_j} \cdot \varphi^{n-1} = B \cdot C^{\ln L_j} \cdot \varphi^{n-1} \quad (1)$$

где: $AT_1=0,4$ мкм – исходный минимальный допуск для первой степени точности и первого интервала длин меньшей стороны угла; $\gamma = \sqrt[10]{10} \approx 1,25$ - коэффициент геометрической прогрессии, членами которой являются системные угловые допуски для разных интервалов длин границ нормируемых углов в пределах одной степени точности; $\varepsilon = \sqrt[5]{10} \approx 1,6$ - коэффициент геометрической прогрессии, членами которой являются границы интервалов длин в системе угловых допусков; L_1 – верхняя граница первого интервала длин сторон углов; L_j - верхняя граница интервала длин, к которому относится верхняя граница нор-

мируемого j -того звена угловой цепи; $\varphi = \sqrt[5]{10} \approx 1,6$ - коэффициент геометрической прогрессии, членами которой являются системные угловые допуски для разных степеней точности в пределах одного интервала длин сторон углов; n - номер степени точности назначаемого допуска; $B = AT_1 \cdot \gamma^{\frac{\ln L_1}{\ln \varepsilon}}$; $C = \left(\gamma^{1/\ln \varepsilon} \right)$.

Достижение точности сборки замыкающих звеньев размерных цепей методом неполной взаимозаменяемости позволяет уменьшить требования к точности размеров деталей, входящих в размерные цепи, при сохранении основных преимуществ полной взаимозаменяемости. На составляющие звенья назначаются расширенные допуски, поэтому у некоторой части изделий замыкающее звено может выйти за пределы заданного допуска. Если доля таких бракованных изделий невелика, то сумма затрат на изготовление неточных деталей и дополнительных затрат на исправление брака будет значительно меньше расходов на точные детали, необходимые для метода полной взаимозаменяемости. В таком случае неполная взаимозаменяемость предпочтительнее. Так как размеры деталей после мехобработки подчиняются законам распределения, при которых их крайние значения маловероятны, то для замыкающего звена (суммы таких размеров), указанный характер распределения выражен еще сильнее. Благодаря этому часто удается получать незначительные доли брака при существенном расширении допусков составляющих звеньев.

При составлении уравнение для расчета номера степени точности n угловых составляющих звеньев с учетом допустимой доли брака при сборке, полей рассеяния и параметров распределения звеньев будем использовать выражение (2) для теоретико-вероятностных расчетов линейных размерных цепей [3, 4]

$$\omega_{\Delta}^2 = t_{\Delta}^2 \cdot \sum_{j=1}^p \omega_j^2 \cdot \lambda_j^2 \quad (2)$$

где: ω_{Δ} - поле рассеяния замыкающего звена; ω_j - поле рассеяния j -того составляющего звена; t_{Δ} - коэффициент риска для замыкающего звена; λ_j - коэффициент относительного рассеяния j -того составляющего звена; p - число составляющих звеньев цепи.

При использовании формулы (3) для расчета угловых размерных цепей в качестве ω_{Δ} и ω_j необходимо использовать соответствующие поля рассеяния углов, приведенные к одинаковой базовой длине. Для упрощения последующих выражений принимаем значение базовой длины 1мм. Тогда приведенное значение поля рассеяния каждого углового звена получится, делением его поля рассеяния на длину его меньшей стороны.

Распределение замыкающего звена, как суммы большого числа независимых случайных величин можно считать нормальным и, используя таблицу функции Лапласа, определять коэффициент t_{Δ} в зависимости от экономически приемлемой доли бракованных изделий. В соответствии с рекомендациями [3,4] для составляющих звеньев в виде положительных отклонений расположения поверхностей деталей от параллельности, от перпендикулярности, от соосности, целе-

сообразно принимать распределение по закону Релея с коэффициентом относительного рассеяния $\lambda_j = 0,1337$.

При наличии в угловой цепи звеньев, поля рассеяния ω_{jcm} (допуски) которых регламентируются стандартами, степень точности следует определить только для остальных составляющих звеньев. Поэтому в правой части уравнения (2) запишем отдельно сумму стандартных и сумму нестандартных полей рассеяния и подставим во вторую сумму в качестве ω_j выражение (1) для TA_j :

$$\omega_{\Delta}^2 = t_{\Delta}^2 \cdot \sum_{j=1}^{p_c} \omega_{jc}^2 \cdot \lambda_{jc}^2 + t_{\Delta}^2 \cdot \sum_{j=1}^{p_n} \omega_j^2 \cdot \lambda_j^2 = t_{\Delta}^2 \cdot \sum_{j=1}^{p_c} \omega_{jc}^2 \cdot \lambda_{jc}^2 + t_{\Delta}^2 \cdot B^2 \cdot \varphi^{2(n-1)} \sum_{j=1}^{p_n} \frac{C^{2 \ln L_j}}{L_j} \cdot \lambda_j^2 \quad (3)$$

После преобразований, логарифмирования и выделения в левой части равенства степени точности n , одинаковой для всех нестандартных звеньев, получим

$$n = \frac{1}{2 \ln \varphi} \cdot \left[\ln \left(\omega_{\Delta}^2 - t_{\Delta}^2 \cdot \sum_{j=1}^{p_c} \omega_{jc}^2 \cdot \lambda_{jc}^2 \right) - \ln \left(t_{\Delta}^2 \cdot B^2 \cdot \sum_{j=1}^{p_n} \frac{C^{2 \ln L_j}}{L_j} \cdot \lambda_j^2 \right) \right] + 1 \quad (4)$$

Рассчитанное значение n следует округлить до ближайшего меньшего целого и использовать для назначения полей рассеяния составляющих угловых звеньев по таблицам допусков (ГОСТ 8908-81 или ГОСТ 24643-81). Сумма назначенных допусков, приведенных к единой базовой длине 1 мм не должна превышать приведенного допуска замыкающего звена.

Выражение, полученное для расчета номера степени точности, может быть полезно инженерам-конструкторам для обоснованного определения допусков угловых размеров деталей машин, для обеспечения при сборке точности важных функциональных геометрических параметров методом неполной взаимозаменяемости.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Единая система допусков и посадок СЭВ в машиностроении и приборостроении: Справочник в 2т. М.: Издательство стандартов, 1989. – Т1 220с.
2. Точность и производственный контроль в машиностроении: Справочник / Под общ. ред. А.К. Кутая М: Машиностроение, 1983, 367с.
3. Солонин И.С., Солонин С.И. Расчет сборочных и технологических размерных цепей. – М.: Машиностроение, 1980. 110 с.
4. Бородачев Н.А. Анализ качества и точности производства.- М.: Машгиз, 1946. 252 с.

УДК 621.3

ОЦЕНКА ОПАСНЫХ СОСТОЯНИЙ И РИСКОВ МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМ ТЕХНИКИ ДЛЯ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Басинюк В.Л.

Объединенный институт машиностроения

Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь

Введение. При обеспечении качества проектирования и изготовления технически сложных механических объектов, как правило, необходимо реализовать требуемый комплекс ее служебных свойств на всех стадиях разработки,

производства, эксплуатации и утилизации. К одному из наиболее важных аспектов этого процесса можно отнести установление и обеспечение требований к качеству их компонентов, в особенности, когда это относится к технике для экстремальных условий эксплуатации, включая космическую, авиационную и железнодорожную. Причем целесообразно, чтобы эти требования опирались на единую нормативную документацию, разработанную международными организациями.

В связи с чрезвычайной важностью приведенных выше вопросов Организацией европейского сотрудничества по стандартизации в области космической деятельности (ECSS) разработана серия стандартов Европейского космического агентства (ЕКА), в соответствии с которыми в рамках программы Союзного государства «Стандартизация-СГ» Объединенным институтом машиностроения НАН Беларуси были подготовлены и изданы государственные стандарты Беларуси СТБ ECSS-Q-ST-60С-2014 «Космическая техника. Обеспечение качества продукции. Компоненты электрические, электронные и электромеханические», СТБ ECSS-Q-НВ-30-01А-2014 «Космическая техника. Обеспечение качества продукции. Анализ наихудшего случая», СТБ ECSS-Q-НВ-30-08А-2014 «Космическая техника. Обеспечение качества продукции. Источники данных о надежности компонентов и их использование».

Методические подходы к обеспечению качества. В ЕКА вопросы обеспечения качества электрических, электронных и электромеханических (ЭЭЭ) компонентов регламентируются стандартом ECSS-Q-ST-60С [1]. Этим стандартом определяется комплекс требований к подбору, контролю, приобретению и применению ЭЭЭ компонентов для космических применений.

В соответствии с подходом ЕКА все используемые в космической технике ЭЭЭ компоненты делятся на три класса, принадлежность к которым определяется требованиями к их надежности и риску. Самая высокая надежность и самый низкий риск при использовании обеспечиваются классом 1, компоненты которого имеют, как правило, наиболее высокую стоимость. Самая низкая надежность и самый высокий риск у компонентов 3-его класса, однако, при этом их стоимость существенно ниже. Стандартом оговаривается, что для снижения общей стоимости создания объекта космического назначения могут быть использованы ЭЭЭ компоненты 2-го и 3-его классов, однако в этом случае должны быть приняты специальные, строго регламентированные нормативно-технической документацией, меры по снижению отрицательного воздействия их более низкой надежности на надежность объекта космической техники (КТ) в целом.

В целом выбор класса компонентов определяются тем, какие цели решаются создаваемым объектом. В соответствии с этими целями осуществляется техническая проработка и определяются ограничения на использование того или иного класса компонентов.

Для комплексного решения задачи обеспечения требуемого качества в стандарте предусмотрены следующие мероприятия: управление программой выбора и оценки соответствия компонентов предъявляемым к ним требованиям при

подборе и утверждении их номенклатуры; регламентация процесса приобретения ЭЭЭ компонентов, последующего обращения с ними и хранения; система обеспечения качества ЭЭЭ компонентов; выделение в отдельный список компонентов специального (особого) назначения и порядок работы с ними; ведение документации, обеспечивающей прослеживаемость на всех стадиях жизненного цикла изделия.

Для обеспечения качества используются следующие механизмы: параллельная разработка и управление компонентами; стандартизация типов компонентов и разумное сокращение их номенклатуры; определение характеристик комплектующих компонентов; оценка уровня производителей компонентов, учитывающая заявленные ими возможности и используемые технологические процессы; проведение испытаний при предварительном отборе и приемочном контроле партии компонентов; проведение периодических испытаний; формирование спецификации закупок; осуществление контроля и осмотра; организация контроля материалов, не удовлетворяющих техническим условиям; оценка и анализ имеющихся данных о применении компонентов, выпускаемых различными производителями, применение специального особого контроля компонентов с ограниченными или недостоверными данными для снижения рисков при их использовании; управление потоками информации.

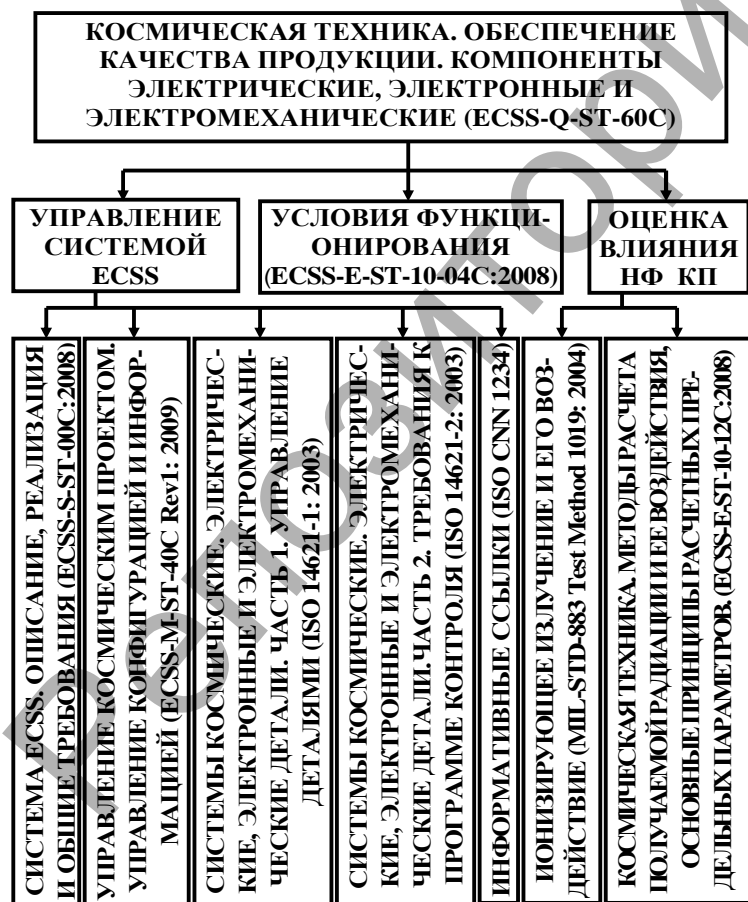


Рис. 1 – Основные ссылки стандарта ECSS-Q-ST-60C

Целесообразно отметить, что стандарт ECSS-Q-ST-60C организационно взаимосвязан с рядом стандартов ISO (рисунок 1) и наиболее важными для КТ нормативными документами, такими, как условия функционирования ЭЭЭ компонентов КТ (ECSS-E-ST-10-04C:2008) и учет влияния на ее работоспособность ионизирующего излучения. В стандарте ECSS-Q-ST-60C [2] приведена методика, посредством которой осуществляется анализ наихудшего случая. Он применяется ко всему электрическому и электронному оборудованию. Метод анализа наихудшего случая (WCA) также используется на уровне подсистем для подтверждения характеристик

электрического интерфейса и требуемых расчётных предельных параметров оборудования. Он применяется на всех этапах проектирования, на которых устанавливаются требования к электрическому интерфейсу и выполняется проектирование электрической схемы. Анализ наихудшего случая используют также для подтверждения обоснованности запаса работоспособности электронных схем во всех условиях эксплуатации. В стандарте ECSS-Q-HB-30-08A [3] приведены источники данных о надежности компонентов и их использование.

Управление компонентами. Для обеспечения качества ЭЭЭ компонентов составляется план управления компонентами. Основная цель и задачи составления плана управления компонентами состоят в том, чтобы определить и структурировать действия, которые будут осуществлены для гарантии того, что менеджмент качества компонентов отвечает целям и соответствует требованиям к проекту, его прогнозируемой стоимости, требованиям минимизации проводимых работ и обеспечения допустимого риска.

В соответствии с этим, система управления компонентами включает вопросы: организации системы менеджмента качества; выбора, оценки, утверждения и закупки компонентов, оговаривающие требования к сплошному контролю с разбраковкой, предварительному осмотру и приемочному контролю партии, заключительному осмотру и поставке, входному контролю, радиационным верификационным испытаниям, разрушающему контролю, подтверждению соответствия, доставке документации изготовителя, его обращению с компонентами и их хранению; обеспечения гарантии качества серийно изготавливаемых компонентов, включающие фиксацию несоответствия или отказов, их предупреждения, прослеживаемости и однородности партии для выборочного контроля; проведения работ с особыми (специализированными) компонентами, включающими заказные специализированные интегральные микросхемы (ASIC), гибридные интегральные микросхемы, однократно программируемые устройства и микроволновые монолитные интегральные микросхемы; требования к документации.

Заключение. Система обеспечения качества ЭЭЭ компонентов космической техники, регламентированная стандартом ECSS-Q-ST-60C и комплексом взаимосвязанных с ним нормативно-технических документов, позволяет эффективно и в полном объеме решать вопросы обеспечения надежности наиболее сложных и ответственных компонентов космической техники. При ее создании и постоянном развитии использован опыт полувековой работы ЕКА в этой сложной наукоемкой сфере.

Поэтому наиболее важные положения этой системы могут быть эффективно использованы в наземных приложениях на всех стадиях жизненного цикла технически сложных и наиболее ответственных изделий и компонентов машиностроения.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. ECSS-Q-ST-60C. Space product assurance. Electrical, electronic and electromechanical (EEE) components. Rev.2 - DIR 1. -ECSS Secretariat ESA-ESTEC Requirements & Standards Division Noordwijk, The Netherlands.- 7.02.2013.
2. ECSS-Q-HB-30-01A:2011 Space product assurance. Worst case analysis. - ECSS Secre-

tariat ESA-ESTEC Requirements & Standards Division Noordwijk, The Netherlands - 14.01.2011.

3. ECSS-Q-HB-30-08A:2011 Space product assurance. Components reliability data sources and their use - ECSS Secretariat ESA-ESTEC Requirements & Standards Division Noordwijk, The Netherlands - 14.01.2011.

УДК 621.81

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ДИНАМИЧЕСКОЙ СТАБИЛИЗАЦИИ ДЛЯ ДИСКОВ ТРЕНИЯ ТЯЖЕЛЫХ ТРАНСПОРТНЫХ МАШИН

Антонюк В.Е.¹, Басинюк В.Л.¹, Ярошевич Е.²

1) Объединенный институт машиностроения Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь

2) Белостокская политехника, Белосток, Польша

Введение. В современных энергонасыщенных гусеничных и колесных машинах в составе тормозных систем широко используются многодисковые маслоохлаждаемые тормоза (ММОТ) с фрикционными дисками, наружный диаметр которых в ряде случаев достигает до 950 мм.

При работе в режиме длительного торможения, например при движении по пересеченной местности, в карьерах и т.п., фрикционные диски ММОТ в ряде случаев работают в режиме длительного торможения. Вследствие этого происходит выделение большого количества тепла и изменение тепловой нагруженности всего узла ММОТ.

Для увеличения эффективности торможения ММОТ фрикционные диски имеют большую, по сравнению с обычными фрикционными дисками, относительную ширину и диаметры. При этом в конструкциях ММОТ одновременно применяется до 20...25 фрикционных дисков и для высокой эффективности их функционирования необходимо обеспечение при изготовлении и сохранение в условиях эксплуатации высокой точности рабочих поверхностей. Потеря точности этих поверхностей приводит к неполному выключению узла ММОТ, возникновению дополнительного тормозного момента и увеличению расхода топлива при работе мобильного средства, что оказывает соответствующее влияние на его работоспособность и надежность.

Область применения фрикционных дисков - механические и гидромеханические передачи, бортовые фрикционы, тормозные устройства современных гусеничных и колесных машин специального и хозяйственного исполнения. На рисунке 1 представлена схема использования фрикционных дисков в многодисковых маслоохлаждаемых тормозах карьерных самосвалов.

Анализ состояния вопроса.

Фрикционные узлы и фрикционные диски можно отнести к одним из наиболее слабых элементов гусеничных и колесных машин. По результатам опыта эксплуатации гусеничных машин 63% фрикционных дисков выходит из строя из-за коробления и 17% из-за износа. Анализ процессов изготовления фрикционных дисков показал, что практически все изготовители фрикционных дисков не обеспечивали и не обеспечивают заданные требования по отклонению от плоскостности рабочих поверхностей дисков.

Так, например, в 1990 году на Уралвагонзаводе до 77% дисков не укладывались в требуемый допуск 0,15 мм, через сутки свободного вылеживания диска происходила его дополнительная деформация. В результате этого до 89% дисков не укладывались в требуемый допуск. Проведенный в 2004 году анализ технологии изготовления дисков на Белорусском автомобильном заводе показал, что до введения технологии динамической стабилизации до 90 % дисков диаметра 588 мм не укладывались в требуемый допуск 0,3 мм.

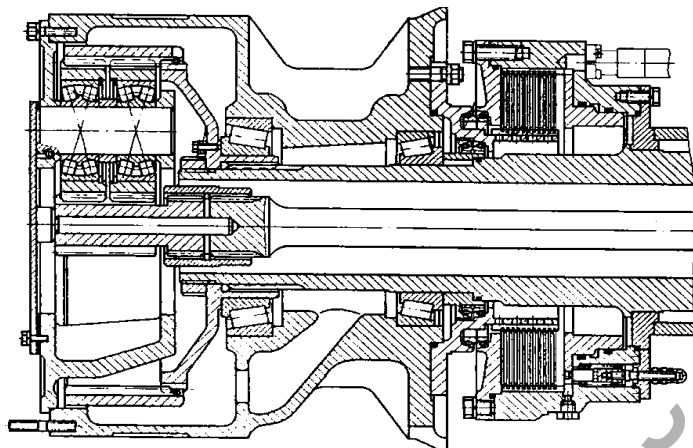


Рис. 1 - Схема использования фрикционных дисков в ММОТ карьерных самосвалов

Однако эти исследования не объясняют причин коробления дисков, хотя именно коробление дисков в процессе эксплуатации является основной причиной их выхода из строя.

Анализ характера коробления дисков в процессе эксплуатации показал, что диски приобретают характерную форму коробления в виде «тарельчатости». Процесс коробления дисков в процессе эксплуатации в основном связан с низкой точностью их рабочих

поверхностей, обуславливающей повышенную тепловую нагруженность, и остаточными напряжениями, в результате которых в процессе эксплуатации возникает коробление в виде «тарельчатости» диска.

Это приводит к уменьшению площади контакта, повышению температуры узла и к дальнейшему увеличению «тарельчатости» дисков, постепенно занимающей свободное пространство гарантированного зазора, необходимого для выключения фрикционного узла. В результате этого возникает постоянное подтормаживание дисков, что приводит к нечеткому включению и выключению фрикциона, повышенному температурному режиму и критическому сокращению срока службы всего фрикционного узла.

Основные направления исследований и разработок. Для решения проблемы повышения точности изготовления дисков и снятия технологических остаточных напряжений была исследована и предложена технология динамической стабилизации [1].

Метод динамической стабилизации основан на том, что при нагружении детали знакопеременной циклической нагрузкой происходит стабилизация геометрической формы детали относительно оси или плоскости приложения знакопеременной нагрузки и одновременно снятие остаточных напряжений.

Для реализации процесса динамической стабилизации при изготовлении фрикционных и тормозных дисков диаметром до 950 мм создана установка с ЧПУ, в которой используется автоматизированная управляющая система, по-

звляющая сформировать различные циклограммы нагружения, и электро-механический привод, что обеспечивает возможность с высокой точностью и гибкостью реализовать расчетные циклограммы нагружения для каждой конкретной детали.

Динамическая стабилизация происходит в узком диапазоне высоких напряжений на уровне предела текучести. В связи с этим возникает необходимость производственной оценки уровня остаточных напряжений после операции динамической стабилизации. Большинство известных методов оценки уровня остаточных напряжений (рентгеновский, ультразвуковой, тензометрический) непригодны для производственного контроля, в связи с чем для эффективного использования технологии с динамической стабилизацией требуется разработка и применение операции производственного контроля остаточных напряжений.

Для реализации этих требований проведены исследования по использованию в качестве производственного контроля остаточных напряжений метода, основанного на использовании свойств магнитной проницаемости с измерением градиента поля от остаточной намагниченности [2-4].

На рисунке 2 представлен график распределения градиента поля от остаточной намагниченности по окружности фрикционного диска. Рассеивание показаний составляет от 285 до 315 А/м², что позволяет сделать вывод о целесообразности использования измерения градиента поля от остаточной намагниченности в качестве неразрушающего производственного контроля при изготовлении фрикционных дисков.

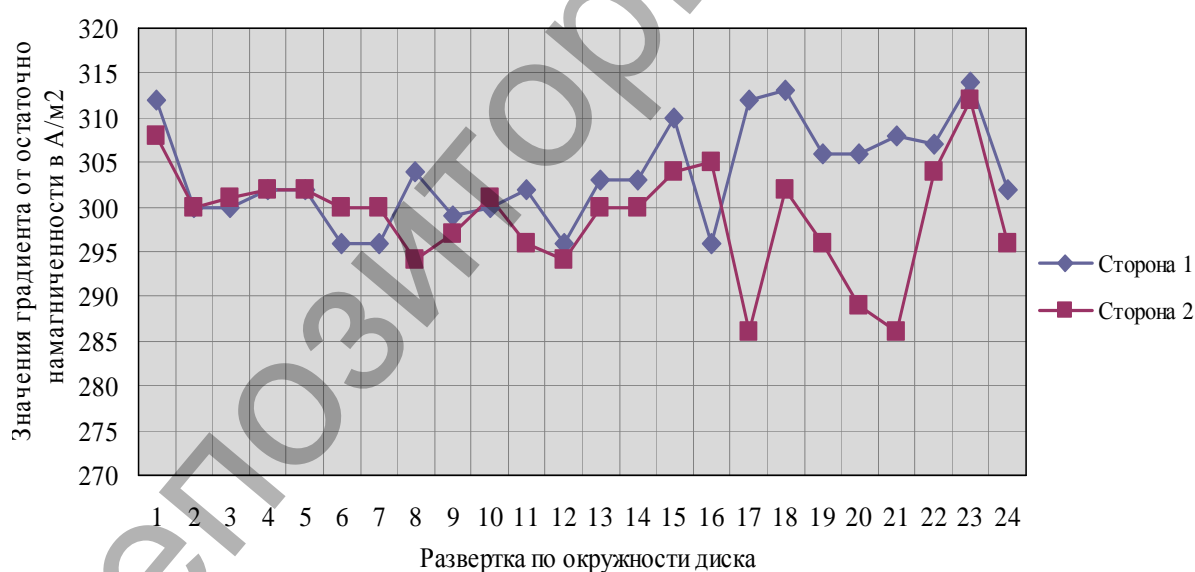


Рис. 2 – Распределение градиента поля от остаточной намагниченности по окружности фрикционного диска

Заключение. Технология изготовления фрикционных дисков с использованием динамической стабилизации позволяет добиться повышенной точности по отклонению от плоскостности рабочих поверхностей дисков, которую невозможно обеспечить другими методами, а также обеспечить минимальные остаточные деформации, что снижает возможности возникновения коробления фрикционных дисков в процессе эксплуатации.

Наиболее рационально использование динамической стабилизации в сочетании с применением метода контроля остаточных напряжений, основанного на использовании свойств магнитной проницаемости с измерением градиента поля от остаточной намагниченности.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Антонюк В.Е. Динамическая стабилизация геометрических параметров деталей знакопеременным нагружением. – Мн.: УП «Технопринт». –2004. – 184 с.
2. Сандомирский С.Г. Применение полюсного намагничивания в магнитном структурном анализе (обзор) // Дефектоскопия. – 2006. № 9. – С.36 - 64.
3. Антонюк В.Е., Сандомирский С.Г., Сидоренко А.Г., Соломина. А.В. Анализ влияния технологии изготовления фрикционных дисков на однородность их магнитных свойств// материалы международной научно-технической конференции «Инновации в машиностроении-2015» 1-2 октября 2015, Минск. – С. 363-364.
4. Антонюк В.Е., Сандомирский С.Г., Jaroszewicz J./ Исследование возможностей оценки остаточных напряжений по градиенту поля остаточной намагниченности// труды XI международной научно-технической конференции «Энергия в науке и технике» Белосток-Клеосин, 20-21 июня 2013.

УДК 621.833.24

ВИБРОАКУСТИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА ЗУБЧАТЫХ ПАР ПЛАНЕТАРНЫХ КОРОБОК ПЕРЕДАЧ

*Ишин Н.Н.¹, Гоман А.М.¹, Скороходов А.С.¹, Натурьева М.К.¹,
Драган А.В.²*

1 – Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси
Минск, Республика Беларусь

2 – Брестский государственный технический университет
Брест, Республика Беларусь

Аннотация. Производство коробок передач, а также бортовых и колесных редукторов, содержащих планетарные ряды, имеет в настоящее время большое значение в свете быстрого развития производства гибридных и электрических транспортных средств, ветрогенераторов и т.д. Однако вопросы производственного и послеремонтного контроля, а также диагностики планетарных механизмов, сегодня еще недостаточно проработаны. В докладе приведен пример использования для диагностики планетарной коробки передач метода синхронного усреднения виброакустического сигнала, позволяющего оценивать состояние ее отдельных элементов.

Состояние вопроса. В процессе производства и эксплуатации коробок передач и редукторов в них могут появляться и накапливаться неисправности, приводящие к несоответствию техническим требованиям. Перед использованием таких редукторов по назначению необходимо знать о наличии неисправностей, которые могут являться причиной нарушения нормальной работы приводного механизма.

Анализ публикаций, посвященных оценке технического состояния приводных механизмов на основе зубчатых передач, показывает, что среди современ-

ных методов безразборного контроля приводных механизмов одними из наиболее перспективных являются виброакустические.

В то же время изучение возможности применения известных заводских методик для проведения оценки качества изготовления и диагностики коробок передач показывает, что проводимая на отечественных предприятиях оценка уровня шума коробок передач в октавных-третьоктавных полосах представляется правомочной с точки зрения оценки общего уровня излучаемого шума, но она не позволяет произвести диагностику и оценить состояние отдельных зубчатых пар, особенно в случае контроля планетарных рядов.

Постановка задачи. Изучением вопросов вибродиагностики и вибромониторинга планетарных механизмов на сегодняшний день занимаются многие фирмы, связанные с производством и эксплуатацией механических приводов. Наиболее актуален данный вопрос там, где надежность планетарного редуктора связана либо с вопросами безопасности (летательные аппараты, морские суда), либо со значительными затратами на ремонт уникальной техники (шахтное оборудование, турбоагрегаты, карьерная техника). При этом для контроля состояния приводов используются практически все методы виброакустической диагностики: обработка временных сигналограмм, анализ спектров, применение взаимокорреляционного метода и т.д. Одним из наиболее широко применяемых является метод синхронного накопления (рисунок 1).

К сожалению, большинство отечественных методик вибрационной диагностики планетарных редукторов (например, [2]) разработано достаточно давно, и не использует последних достижений в области выделения и распознавания сигналов от отдельных зубчатых колес. Изготавливаемые в единичных экземплярах диагностические комплексы для оценки качества изготовления и мониторинга технического состояния механических приводов [3] хотя и позволяют проводить контроль планетарных редукторов [4], также нуждаются в дальнейшем развитии методического и программного обеспечения.

Результаты исследований. Конструктивные особенности планетарной передачи накладывают свой отпечаток не только на вид движения ее зубчатых колес, но и на характер возбуждения колебаний, способы представления и анализа информации [2].

В схеме планетарного механизма угловая скорость изменяется в соответствии со следующим уравнением кинематики:

$$i_{ab}^h = \frac{\omega_a - \omega_h}{\omega_b - \omega_h},$$

где $i_{ab}^h = -z_b/z_a$ — передаточное отношение от центрального колеса с внешними зубьями a к центральному колесу с внутренними зубьями b в движении относительно водила h .

Следовательно, применяя метод синхронного усреднения для механизмов планетарного типа, следует период усреднения для каждого из валов редуктора принимать равным не обороту соответствующего вала, а полному циклу пересопрежения всех зубьев размещенного на нем зубчатого колеса. Еще более ус-

ложняется задача при попытке выделения сигнала вибрации для каждого из сателлитов.

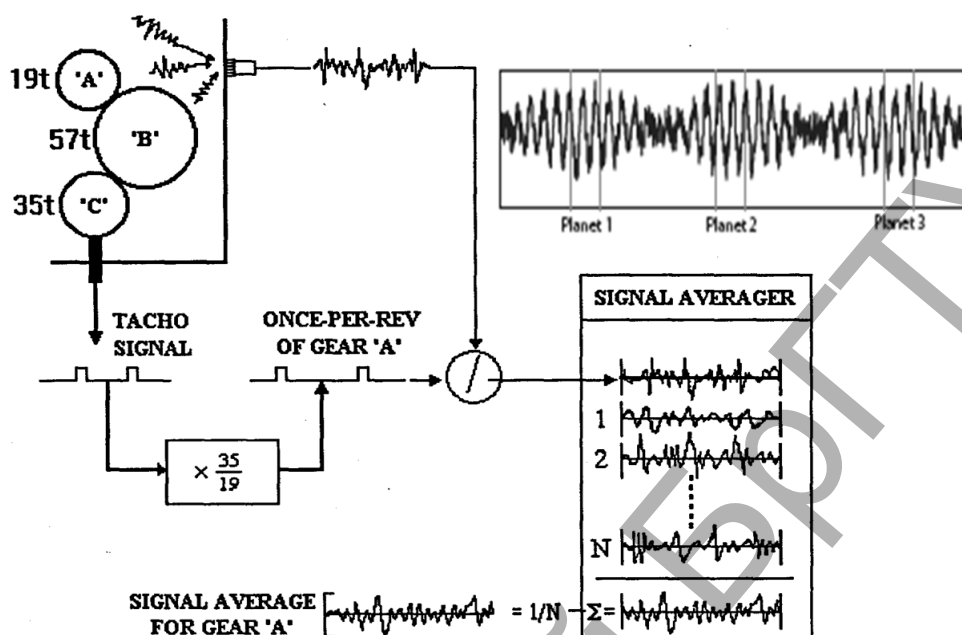


Рисунок 1 – Применение метода синхронного накопления при вибродиагностике планетарного редуктора вертолета Black Hawk [1]

Проведенные на стенде ОИМ НАН Беларуси с использованием разработанного в БрГТУ диагностического комплекса исследования шума и вибрации коробки передач, содержащей планетарный демультипликатор, показали, что выделение периодической компоненты исследуемого процесса методом синхронного накопления дает достаточно хорошие результаты. Однако, при этом диагностируемая система должна быть оснащена датчиками угла поворота на входном и, желательно, на выходном валах (рисунок 2).

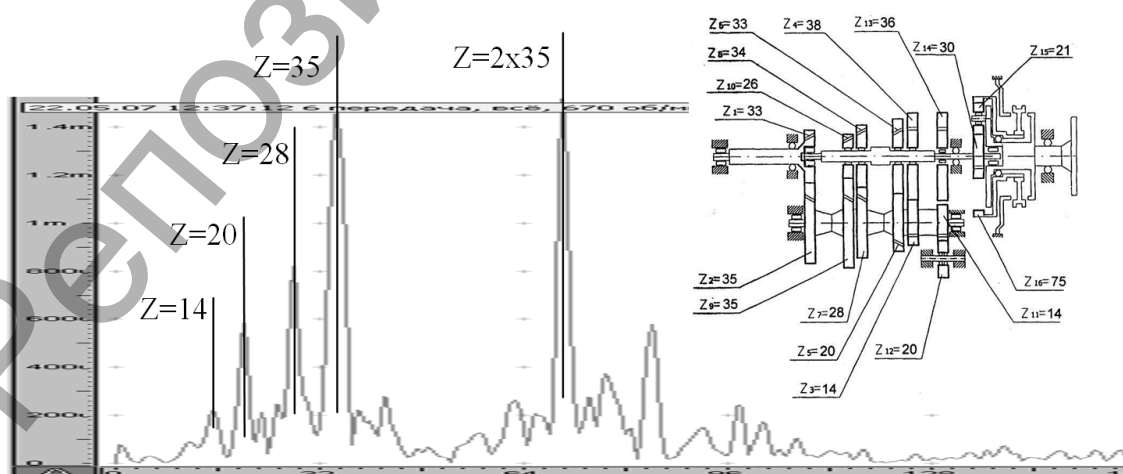


Рисунок 2 – Гармонические составляющие шестерен промежуточного вала на спектре шума рядом – планетарной коробки передач

Заключение. Спецификой диагностики планетарных коробок передач во многих случаях является невозможность использования штатных средств контроля, вызванная особенностями кинематики данных приводов. Большие проблемы при диагностировании дефектов зубозацепления в планетарных редукторах вызывает также отсутствие методик нормирования по допустимым уровням как всего виброакустического сигнала, так и отдельных его составляющих.

Кроме того, при распространении вибрационного сигнала к месту замера на корпусе объекта происходит его изменение вследствие демпфирования колебаний, их наложения и т.д. В меньшей степени эта проблема актуальна для угловых колебаний валов, что следует шире использовать при создании аппаратуры и методик для контроля сложных многоступенчатых механизмов.

Существует еще одна актуальная на сегодняшний день, но совершенно не затронутая в отечественной технической литературе задача. Она касается развития методик диагностики планетарных коробок передач на основе алгоритма синхронного усреднения в плане выделения и анализа гармонических составляющих для каждого из сателлитов планетарного ряда, а также их подшипников.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Blunt, D.M. A Portable Transmission Vibration Analysis System for the S-70A-9 Black Hawk Helicopter / D.M.Blunt, B.Rebbechi, B.D.Forrester, K.W.Vaughan / [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://dspace.dsto.defence.gov.au/dspace/handle/1947/4161> – Дата доступа 22.10.2008.

2. Генкин, М.Д. Виброакустическая диагностика машин и механизмов. / М.Д. Генкин, А.Г. Соколова. – М.: Машиностроение, 1987. – 288 с.

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

4. Ишин, Н.Н. Опыт использования метода синхронного накопления для вибродиагностики трансмиссионных систем автотракторной техники / Н.Н. Ишин, А.С. Скороходов, В.С. Александрова, Л.М. Антюшеня, И.И. Новик, А.В. Драган // Энергосберегающие технологии и технические средства в сельскохозяйственном производстве: доклады Международной научно-практической конференции, Минск, 12-13 июня 2008 г. в 2 ч. Ч.1. – Минск. –2008. – С. 355 – 361.

УДК 621.998.77

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОКАЛИНЫ СТАЛИ В КАЧЕСТВЕ ОСНОВНОГО КОМПОНЕНТА ЭКЗОТЕРМИЧЕСКОЙ СМЕСЕЙ

Савюк И.В., Рудь В.Д., Самчук Л.М., Повстная Ю.С.

Луцкий национальный технический университет

Луцк, Украина

При непрерывном разливке стали, нагревании и обработке металла давлением (горячей прокатки, штамповке, ковке) образуется окалина - слой, состоящий из оксидов железа FeO (вюстит), Fe₂O₃ (гематит), Fe₃O₄ (магнетит). В процессе обжима окалина отслаивается от металла и совместно с водой и маслами поступает в отстойники. Химический состав окалины в основном зависит от усло-

вий термообработки и химического состава металла, а количество окалины (толщина пленки) - от условий термообработки [1]. На территории Украины ежегодно образуется более 250 млн. тонн железной окалины, из которых 120 тыс. тонн приходится на сухую окалину кузнечно-прессового производства. Переработка и использование окалины, которая почти не используется, позволяет заменить дорогостоящий чугун, литевную сталь и решить экологические проблемы, в настоящее время достаточно актуально.

Особого внимания в аспекте использования отходов заслуживает окалина кузнечно-штамповочного производства, так называемая сухая окалина. Такая окалина содержит до 70% железа, в то время как железная руда 45-60%, что делает переработку окалины экономически выгодным [2].

В работе объектом исследований является окалина стали 18X2H4MA кузнечно-штамповочного производства ОАО «Ковельсельмаш». Предварительно определено химический состав окалины: 58-59% оксида железа Fe_3O_4 , 40-48% железо - феррит Fe_2O_3 и 1,5-2,0% оксиды легирующих элементов. Наличие большого количества оксида железа, по сути решает вопрос о применении окалины в дальнейших технологических процессах или ее переработке. Как известно, оксиды металлов легко восстанавливаются более легкими металлами. Именно это дало толчок к использованию окалины в качестве основного компонента экзотермической смеси.

Перед приготовлением экзотермической смеси окалина подвергалась просушке и измельчению. Для приготовления термитной смеси использовали окалину фракцией 0.4 мм и порошок алюминия размером 0.3 мм. Термитная смесь готовилась в классическом соотношении 23% Al и 77% окалины. Для инициирования экзотермической реакции был применен воспламенитель, состоящий из смеси порошков BAO_2 и Al в процентном соотношении 80:20. После прохождения экзотермической реакции образуется примерно 55-60% восстановленного железа и 40-45% шлака. Полученный материал характеризуется монолитной структурой, высокой твердостью и прочностью. С целью определения качества материала на микроанализаторы РЭММА-102 проведено поэлементный анализ состава материала, результаты которого представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Химический состав полученного материала

№ образца	Элемент, %							
	C	Si	C r	M o	M n	N i	F e	A l
1	0,43	0,21	0,22	0,19	-	-	98,94	-
2	0,29	0,22	0,19	0,15	-	0,08	99,02	0,05
3	0,33	0,25	0,3	0,2	0,07	0,02	98,73	0,1
4	0,29	0,24	0,24	0,16	-	-	99,03	0,04
Среднее	0,33	0,23	0,23	0,17	0,01	0,02	98,93	0,04

Как видно из таблицы 1, основным компонентом материала является железо. Уменьшенное содержание углерода положительно влияет на механические свойства материала. Это объясняется уменьшением количества и улучшением

формы углерода при одной и той же структуре основной металлической массы. Преимущество такого метода переработки окалины в том, что при добавлении легирующих элементов в шихту можно получить материал с заданными химическими и механическими свойствами [3,4]. Использование окалины в термитных шихтах позволяет существенно удешевить процесс получения термитных материалов и получить дешевый металл с заданными химическими и физическими свойствами.

Полученная экзотермическая смесь была использована для сварки конструкционного элемента из стали Ст3 по ГОСТ 380-2005. Сваренные образцы представлены на рисунке 1.



Рисунок 1 – конструкционные элементы сваренные данной экзотермической смесью (а) и в разрезе (б, в)

Как видно из рисунка 1а, жидкое железо, которое образовалось при сжигании термитной смеси, заполнило свободное пространство между элементами конструкции, что обеспечило надежное их соединение. При разрезе сварной конструкции (рисунок 1б, в) установлено, что металл восстановлен алюмотермической реакцией, проплавливая свариваемый металл в достаточной мере для надежного сцепления.

Из данных результатов можно сделать вывод, что окалину стали 18Х2Н4МА можно использовать в качестве основного компонента термитной шихты. Однако для оптимизации процесса сварки и повышения качества сварного шва необходимо доработать элементарный состав шихты и определить термодинамические параметры процесса ее горения.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Сталинский Д.В. Переработка и возврат в производство замасленной окалины / Д.В. Сталинский, А.М. Касимов, А.З. Рыжавский, В.А. Бодштейн. Энерго и ресурсосбережение. Переработка отходов. Экология и промышленность №4, 2014. - с. 72 - 76.
2. Семиноженко В.П. Промышленные отходы: проблемы и решения / В. П. Семиноженко, Д. В. Сталинский, А. М. Касимов: монография. - Х.: Индустрия, 2011. - 544 с.
3. Жигуц Ю.Ю. Служебные свойства легированных чугунов, синтезированных комбинированными процессами / Лазарь В.Ф. Научный вестник Мукачевского государственного университета, Журнал научных трудов №17 Естественные и технические науки. (12) "2014, с. 5-11.
4. Ю.Ю.Жигуц / технология получения термитной стали марки 70Л. «МЕТАЛЛУРГИЯ». Выпуск 1 (31), 2014 с. 49-53

СВОЙСТВА И ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ПЛАСТИЧНЫХ СМАЗОК НА ОСНОВЕ КАЛЬЦИЕВОГО И ЛИТИЕВОГО КОМПЛЕКСА

Жорник В.И.¹, Дудан А.В.², Гуца А.А.²

1) Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси

Минск, Республика Беларусь

2) Полоцкий государственный университет

Новополоцк, Республика Беларусь

Непрерывное повышение нагрузочно-скоростных режимов работы трибосоединений и связанное с ним повышение температур материала деталей в зоне трения требует постоянного совершенствования смазочных материалов, методов расширения их нагрузочного и температурного диапазонов работы.

Одним из эффективных способов улучшения свойств пластичных смазочных материалов является модифицирование пластичных смазок введением в их состав функциональных добавок. В настоящее время все большую актуальность приобретает использование в качестве подобных добавок наноразмерных компонентов различной природы. При этом наноразмерные частицы добавки вводятся в состав смазочного материала в виде агрегатов наночастиц, которые необходимо диспергировать для активации их структурообразующих качеств и улучшения реологических и трибологических свойств смазки [1]. Подобный подход относится к физическим принципам модифицирования смазочных материалов наноконпонентами [2].

Высокощелочные сульфонаты кальция, являющиеся основой сульфонатных смазок, широко используются в качестве моющих и диспергирующих присадок к моторным маслам, а также ингибиторов коррозии. В сульфонатных присадках аморфные частицы карбоната кальция с размером 2–15 нм стабилизированы в масле сульфонатом кальция, образуя светлые и чистые дисперсии малой вязкости [3].

Смазка на основе минерального базового масла и комплексного загустителя сульфоната кальция имеет структуру дисперсной фазы в виде совокупности звездообразных мицелл, состоящих из тонких игольчатых кристаллов сульфоната кальция, покрытых стабилизирующими оболочками из полимеров и объединенных между собой за счет сил межмолекулярного взаимодействия. Подобная форма структурированного подвижного каркаса дисперсной фазы обуславливает высокую адаптивность пластичной смазки к уровню механической и термической нагруженности узла трения. Смазка характеризуется высокими противозадирными свойствами, водостойкостью, термической стойкостью, уникальной механической стабильностью, улучшенными антиокислительными и антикоррозионными характеристиками. Она находит применение в смазывании высоконагруженных подшипников качения и скольжения машин и оборудования, работающих при низких и средних скоростях в диапазоне температур от –30 до +200 °С (кратковременно до +240 °С), а также механизмов, работающих в условиях повышенной влажности (до 100 %).

Для смазывания средне- и тяжело нагруженных узлов трения, а также узлов трения, работающих в условиях высоких температур (сталепрокатные станы, кузнечно-прессовое оборудование, теплоэнергетическое оборудование, вентиляторы печей, системы приточно-вытяжной вентиляции и др.), высоких нагрузок и вибраций (карьерная техника, железнодорожный транспорт, строительные дорожные машины, сельхозтехника) применяют пластичные смазки, полученные загущением минеральных масел литиевым комплексом. Такие смазки отличаются высокой механической стабильностью и нагрузочной способностью, устойчивостью к воздействию повышенных температур, водостойкостью. Диапазон рабочих температур варьируется от -30 до $+150$ °С (кратковременно до $+180$ °С). По данным Национального Института Смазок США (NLGI) они составляют 70 % от всех смазок, используемых в мире.

Часто для повышения антиокислительных, антикоррозионных, противоизносных, противозадирных и антифрикционных свойств в пластичные смазки с комплексным литиевым загустителем применяют в сочетании с алмазосодержащим пакетом добавок. Это позволяет получить смазочный материал повышенного ресурса с пространственно сшитым каркасом из коротковолокнистых нитей, обладающий большей маслоудерживающей способностью, что определяет более высокую нагрузочную способность (в 1,6–3,3 раза), расширенный на 30–40 °С диапазон рабочих температур и увеличенный в 1,4–1,7 раза ресурс смазки [4].

Широко распространено совместное применение литиевого и кальциевого комплекса в качестве загустителя. Благодаря загустителю смешанного типа пластичная смазка отличается высокой механической и коллоидной стабильностью, повышенными противозадирными свойствами, улучшенной адгезией, формирует долговременную смазывающую пленку, снижающую затраты на техническое обслуживание узла трения. Такие смазки применяют для смазывания тяжело нагруженных шаровых опор, подшипников скольжения и качения, карданных соединений, шасси и прочих узлов транспортных средств, подверженных ударным или вибрационным воздействиям, узлов сельскохозяйственных машин и внедорожников, работающих во влажных, пыльных и/или засушливых условиях. Они пригодны в качестве универсальной смазки общего назначения для промышленного оборудования. Диапазон рабочих температур от -20 до $+140$ °С.

Пластичная смазка на основе смеси высокоочищенных минеральных масел с кинематической вязкостью $80-100$ мм²/с при 40 °С, загущенных литиевым и кальциевым мылом 12-гидрооксистеариновой кислоты является экологически безопасной, что позволяет применять ее в низко-, средне- и высоконагруженных узлах трения оборудования пищевой и фармацевтической промышленности при возможном контакте (допуск H2 USDA) с продуктами переработки и допустимой рабочей температуре эксплуатации от -30 до $+120$ °С.

Таким образом, использование в качестве загустителя кальциевого и литиевого комплексов позволяет существенно улучшить реологические и трибологические свойства пластичных смазок, расширить области их применения, а в со-

четании с алмазосодержащим пакетом добавок увеличить ресурс смазки в 1,4–1,7 раза и ее маслоудерживающую способность за счет активации структурообразующих качеств.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Гринкевич, К.Э. Трибологические характеристики смазок с нанопорошками дихалькогенидов молибдена и вольфрама / К.Э. Гринкевич [и др.] // Смазочные материалы: тез. 9-ой междунар. науч.-техн. конференции (Бердянск, 4–8 сентября 2006) Изд. Нац. университета «Львівська політехніка». – Львов, 2006. С. 22–24.

2. Жорник, В.И. Влияние твердых наноразмерных добавок на структуру пластичной смазки и механизм изнашивания поверхности трения / В.И. Жорник, А.В. Ивахник, В.П. Ивахник // Механика машин, механизмов и материалов. – 2010. – № 3 (12). – С. 85–92.

3. Жорник, В.И. Структура и свойства пластичной смазки на основе сульфоната кальция / В.И. Жорник [и др.] // Вестник Полоцкого государственного университета, Серия В. Промышленность.– Новополоцк, 2015. – № 11. - С. 63-68.

4. Lubricant oils and greases containing nanoparticle additives: patent WO2006119502 A3 USA, МПК7 C10M159/24 / J.A. Waynick; заявитель Southwest Res Inst. –№ PCT/US2006/017564; – заявл. 03.05.2006; опубл. 08.11.2007.

УДК 621.9.06

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАГРУЗКИ ОБОРУДОВАНИЯ МНОГОНОМЕНКЛАТУРНЫХ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ УЧАСТКОВ

Медведев О.А., Мелешук Д.В.

Брестский государственный технический университет
Брест, Республика Беларусь

Многономенклатурные автоматизированные производственные участки являются эффективным средством повышения производительности труда в условиях мелкосерийного и среднесерийного производства. При большом разнообразии номенклатуры деталей, обрабатываемых на участке, интервалы времени обработки деталей на многоцелевых станках и интервалы времени транспортирования деталей с помощью автоматизированной транспортно-складской системы характеризуются большим рассеянием значений. В этих условиях оценка эффективности работы участка путем построения циклограмм, характерных для оценки работы автоматических линий, с учетом средних значений указанных интервалов приводит к завышенным результатам. При этом не учитываются потери связанные с возможностью одновременного простоя нескольких станков в ожидании загрузки новыми заготовками, а также простои, возникающие из-за неравномерного поступления заготовок. В данной работе рассмотрены возможности использования методов теории массового обслуживания для моделирования и оценки эффективности работы многономенклатурных участков учитывающие стохастический характер времени работы отдельных элементов. Анализ взаимосвязанной работы элементов участков показал, что их можно считать многоканальными двухфазными системами массового обслуживания [1, 2] (первая фаза - транспортирование заготовок к станкам транспортным роботом, вторая - их обработка на станках) с очередями из заготовок перед первой

и второй фазами в виде центрального накопителя, обслуживаемого штабелем, и пристаночных накопителей. Требованиями на обслуживание являются заготовки, поступающие с участка их подготовки.

Теория массового обслуживания позволяет осуществить анализ работы системы при допущениях, что интервалы между поступающими требованиями на обслуживание и интервалы времени обслуживания подчиняются показательному закону распределения. В ряде работ [1, 2] показывается, что к таким условиям системы приспосабливается труднее. Рассчитанная на этот случай, при других распределениях система работает эффективнее. Поэтому, на стадии проектирования участка, когда нет сведений о распределении интервалов времени можно принять гипотезу о показательном законе их распределения.

Так как моменты поступления спутников на обслуживание и моменты окончания обслуживания в каждой фазе случайны, то число спутников, находящихся в обеих фазах обслуживания случайным образом меняется во времени. Поэтому состояние системы $E(i;j)$ в конкретный момент времени можно характеризовать числом заготовок, находящихся в фазе транспортирования - i и в фазе обработки - j . Так как на участке имеется ограниченное число спутников, то система имеет конечное число состояний.

Переход системы из состояния в состояние происходит под действием потока требований на обслуживание и потоков «обслуживаний» в первой и второй фазах. Если интервалы времени между сменой состояний подчиняются показательному закону распределения, то моменты смены состояний распределяются по закону Пуассона и средние интенсивности смены состояний равны плотностям вероятностей соответствующих переходов из состояния в состояние. Среднюю интенсивность λ поступления заготовок с участка их подготовки в центральный накопитель можно определить, поделив единицу на среднее время их подготовки. Аналогично определяются интенсивности окончания обслуживания в первой μ_1 и второй μ_2 фазах. Для наглядного представления всех состояний системы и интенсивностей переходов между состояниями целесообразно составить размеченный граф состояний в виде плоской фигуры, состоящей из прямоугольников или окружностей, соответствующих возможным состояниям участка и стрелок между ними, соответствующих интенсивностям переходов из состояния в состояние.

Определение вероятностей состояний системы осуществляется при помощи дифференциальных уравнений Колмогорова [2], которые связывают вероятности соседних состояний системы и плотности вероятностей переходов между этими состояниями. Уравнение Колмогорова для состояния $E(0;0)$ получается следующим образом. Вероятность $P_{00}(t+\Delta t)$ того, что система в момент времени $t+\Delta t$ будет находиться в состоянии $E(0;0)$ будет равна, сумме двух вероятностей: того, что система уже была в состоянии $E(0;0)$ и за время Δt из него не вышла и того, что система была в состоянии $E(0;1)$ и за время Δt перешла в состояние $E(0;0)$.

Первая из этих вероятностей равна

$$P_{00}(\Delta t) = (1 - \lambda \cdot \Delta t) \cdot P_{00}(t) \quad (1)$$

Вторая вероятность равна

$$P_{01}(\Delta t) = \mu_2 \cdot \Delta t \cdot P_{01}(t) \quad (2)$$

Тогда

$$P_{00}(t + \Delta t) = (1 - \lambda) \cdot P_{00}(t) + \mu_2 \cdot \Delta t \cdot P_{01}(t)$$

После преобразований с учетом того что Δt стремится к нулю получим выражение для производной вероятности P_{00}

$$\frac{dP_{00}(t)}{dt} = -\lambda \cdot p_{00}(t) + \mu_2 \cdot p_{01}(t) \quad (3)$$

Аналогично получаются уравнения для вероятностей других состояний.

Для любой системы с конечным числом состояний, в которой возможен переход из каждого состояния в каждое другое за конкретное число шагов, при длительном функционировании наступает предельный стационарный режим, при котором каждое состояние осуществляется с некоторой постоянной вероятностью. При этом производные вероятностей состояний равны нулю и уравнения Колмогорова превращаются в линейные алгебраические уравнения. Так как интерес представляют показатели работы участка в течение длительного промежутка времени, то определение вероятности состояний системы целесообразно осуществлять для стационарного режима.

Линейные алгебраические уравнения, составленные для всех возможных состояний системы, образуют математическую модель временных связей элементов участка. Они являются однородными и позволяют определить вероятности состояний с точностью до постоянного множителя. Для определения численных значений $P(i,j)$ любое из уравнений системы заменяется нормировочным условием:

$$\sum_{i=1}^{j_{\max}} \sum_{j=1}^{i_{\max}} p_{ij} = 1 \quad (4)$$

Коэффициент загрузки оборудования по времени будет равен сумме вероятностей тех состояний, в которых на обслуживании находится хотя бы один спутник с заготовкой.

Коэффициент загрузки основного оборудования равен:

$$K_c = \frac{n_{cp}}{n} \cdot K_{cm} \quad (5)$$

где n_{cp} – среднее число накопителей, имеющих не менее одного спутника; n – число промежуточных накопителей, равное числу станков; K_{cm} – коэффициент использования станка, при условии постоянной занятости хотя бы одной позиции накопителя.

Значение n_{cp} , при известных вероятностях состояний системы, определяется как сумма произведений числа спутников в накопителе в каждом состоянии системы m_n на вероятность соответствующего состояния системы

$$n_{cp} = \sum_{i=1}^{j_{\max}} \sum_{j=1}^{i_{\max}} m_n \cdot p_{ij} \quad (6)$$

где: $m_n = j$, при $j < n$ или $m_n = n$, при $j \geq n$
Значение $K_{см}$ определяется по формуле

$$k_{см} = \frac{t_{маш}}{t_{маш} + t_{см}} \quad (7)$$

где: $t_{маш}$ - среднее машинное время обработки на одном станке; $t_{см}$ – время смены спутника между столом станка и позицией промежуточного накопителя.

Для определения среднего числа приспособлений – спутников, находящихся между участком их подготовки и станками разработана формула:

$$m_{ср} = \sum_{i=1}^{i_{max}} \sum_{j=1}^{j_{max}} (i + j) \cdot p_{ij} \quad (8)$$

По вероятностям состояний также можно установить требования к интенсивности обслуживания штабелёром, и транспортным роботом для достижения нормативного коэффициента загрузки оборудования по времени.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Вентцель Е.С. Исследование операций: М.: Советское радио. 1972
2. Новиков О.А., Петухов С.М. Прикладные вопросы теории массового обслуживания.- М.: Советское радио. 1969.
3. Гибкие производственные комплексы/ Под. ред. П.И. Белянина.-М.: Машиностроение, 1984

УДК 535.016

СТРУКТУРА И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЛИМЕРНЫХ ПЛЕНОК, ПОДВЕРЖЕННЫХ ЛАЗЕРНОМУ ОБЛУЧЕНИЮ

Гаврилова В.В., Шупан П.И.

Гродненский государственный университет имени Янки Купалы Гродно,
Республика Беларусь

Лазерное облучение является актуальным методом, позволяющим изменить свойства различных материалов. Характер воздействия лазерного излучения зависит от режимов облучения.

Целью работы является исследование структуры, механических свойств и морфологии поверхности полимерных пленок при воздействии на них лазерного излучения различной плотностью мощности.

Исследуемыми материалами являлись: полиэтилентерефталатная пленка (ПЭТФ ТУ 6-05-1543-87) толщиной 40 мкм, полиэтиленовая пленка (ПЭВД ГОСТ 16338-85) толщиной 100 мкм, полипропиленовая пленка (ПП ГОСТ 26996-86) толщиной 40 мкм. Перед облучением пленочные образцы очищались от загрязнений этиловым спиртом.

Источником излучения являлся рубиновый лазер ГОР-100М, работающий в режиме свободной генерации с длительностью импульса 1,2 м/с. Энергия лазерных импульсов составляла 10, 20, 40 и 50 Дж. Диаметр пятна фокусировки составлял 40 мм.

Исследование структуры поверхности пленок проводили методом ИК-спектроскопии с использованием спектрофотометра SPECORD 75-1R.

Морфологию и топографию поверхности оценивали методом атомно-силовой микроскопии (АСМ) с использованием атомно-силового микроскопа NT - 206. Сканирование проводили на воздухе, при нормальных условиях и комнатной температуре с использованием кантилевера CSC 38/AIBS жесткостью 0,03 Н/м.

Прочностные испытания проводили на разрывной машине РМ-30-1 согласно ГОСТ 14236-81 [1].

Полученные данные ИК-спектроскопии полиэтилентерефталатной пленки указывают на то, что лазерное воздействие приводит к значительным структурным изменениям и изменению оптической плотности: в области прозрачности ($1850 - 2700 \text{ см}^{-1}$) появляются новые полосы поглощения: $2100 - 2200 \text{ см}^{-1}$, соответствующие группе $\text{C}\equiv\text{C}$; 1600 см^{-1} – указывает на появление карбонильной группы. Степень кристалличности характеризуется в ПЭТФ полосой 1343 см^{-1} , а области аморфности – полосой 1370 см^{-1} .

ИК-спектроскопия пленок ПЭВД показала, что их структура при облучении лазером существенно не изменяется, однако интенсивность полосы поглощения, соответствующей длине волны 2873 см^{-1} , увеличивается, что характерно для группы С-Н. Из этого следует, что концентрация группы атомов С-Н увеличилась. Оптическая плотность по мере увеличения мощности излучения увеличивается от 1,08 до 1,25. Изменение интенсивности полос, соответствующих длинам волн 2008 см^{-1} и 1887 см^{-1} , свидетельствует об увеличении степени кристалличности.

Результаты ИК-спектроскопии полипропиленовых пленок говорят о значительном уменьшении интенсивности полос, особенно в области от 1500 до 2600 см^{-1} , соответствующей зоне прозрачности.

Полученные результаты механических испытаний образцов пленок указывает на влияние ЛИ на показатели прочности при растяжении (таблица 1).

Таблица 1 – Результаты механических испытаний

Плотность мощности, Вт/см ²	Прочность при растяжении, МПа		
	ПЭТФ	ПП	ПЭВД
0	75	43	22
0,85	95	45	15
2	95	46,5	13,5
3,3	82	47	23
4,5	100	43	24

По результатам механических испытаний можно сделать вывод о том, что предел прочности исследуемых материалов при растяжении зависит от мощности лазерного излучения. Для пленок ПЭВД и ПЭТФ максимальная прочность наблюдается после облучения лазером плотностью мощности $4,50 \text{ Вт/см}^2$, для ПП пленок – $3,30 \text{ Вт/см}^2$.

Проведенный анализ АСМ-изображений показал, что при облучении полимерных пленок лазером изменяется топография и морфология поверхности.

Воздействие лазерного излучения (ЛИ) плотностью мощности $2,00 \text{ Вт/см}^2$ на пленки ПЭТФ приводит к появлению светлых участков, которые равномерно распределены по всей поверхности исследуемого образца (рисунок 1, б). При анализе пленки, обработанной лазерным излучением плотностью мощности $3,30 \text{ Вт/см}^2$ наблюдается резкий контраст между светлыми и темными участками. Возможно, это снижает прочность пленок (рисунок 1, в). При увеличении плотности мощности ЛИ до $4,50 \text{ Вт/см}^2$ происходит сглаживание контраста между участками высокой и низкой твердости (рисунок 1, г).

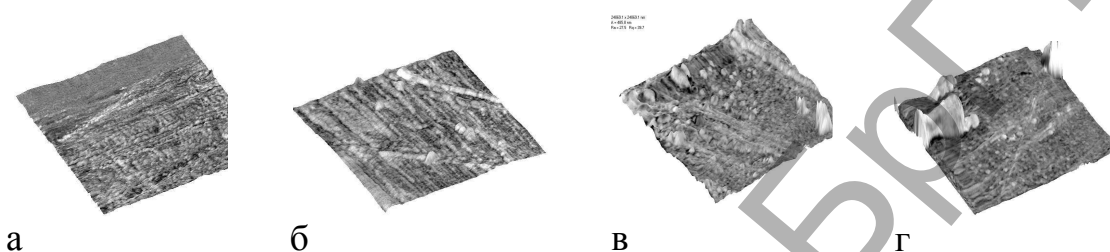


Рисунок 1 – 3-D вид АСМ-изображения поверхности пленки ПЭТФ: а - пленка ПЭТФ, не обработанная ЛИ; б - облучение ЛИ при $q=2,00 \text{ Вт/см}^2$; в - облучение ЛИ при $q=3,30 \text{ Вт/см}^2$; г - облучение ЛИ при $q=4,50 \text{ Вт/см}^2$

Анализ АСМ-изображений поверхности пленки ПЭВД показывает, что при облучении плотностью мощности $2,00 \text{ Вт/см}^2$ появляется зернистость рельефа (рисунок 2, б). Эта структура является одноуровневой, так как не наблюдается группирование зерен в более крупные образования. Имеют место отдельные участки, представляющие собой скопление зерен больших размеров. При повышении плотности мощности ЛИ до $3,30 \text{ Вт/см}^2$ характер рельефа пленки меняется (рисунок 2, в). Наблюдаемые ранее зерна группируются в более крупные конгломераты, что, скорее всего, приводит к увеличению прочностных характеристик. После облучения пленки ЛИ плотностью мощности $4,50 \text{ Вт/см}^2$ на поверхности образуются отдельные участки – кластеры, которые на рисунке имеют более светлый оттенок по сравнению с общим фоном (рисунок 2, г).

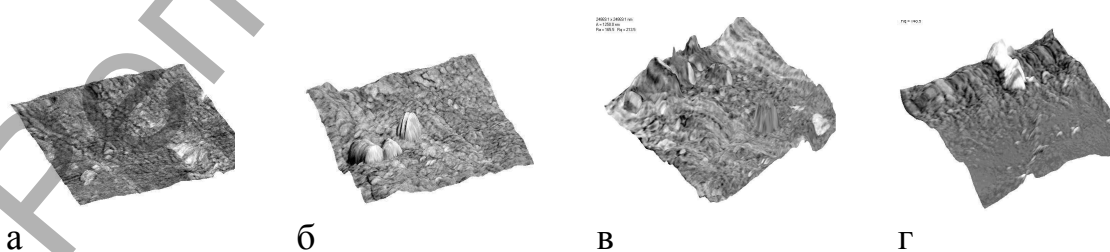


Рисунок 2 – 3-D вид АСМ-изображения поверхности пленки ПЭВД: а - пленка ПЭВД не обработанная ЛИ; б - облучение ЛИ при $q=2,00 \text{ Вт/см}^2$; в - облучение ЛИ при $q=3,30 \text{ Вт/см}^2$; г - облучение ЛИ при $q=4,50 \text{ Вт/см}^2$

На поверхности пленки ПП после облучения мощностью $2,00 \text{ Вт/см}^2$ образуются отдельные участки, представляющие собой скопление зерен больших размеров (рисунок 3,б). Повышение плотности мощности ЛИ до $3,30 \text{ Вт/см}^2$ приводит к распределению этих скоплений зерен по всей поверхности пленки (рисунок 3,в). Увеличение плотности мощности ЛИ до $4,50 \text{ Вт/см}^2$ приводит к сглаживанию рельефа (рисунок 3,г). Наблюдается поверхность идентичная поверхности необработанного образца (рисунок 3,а).

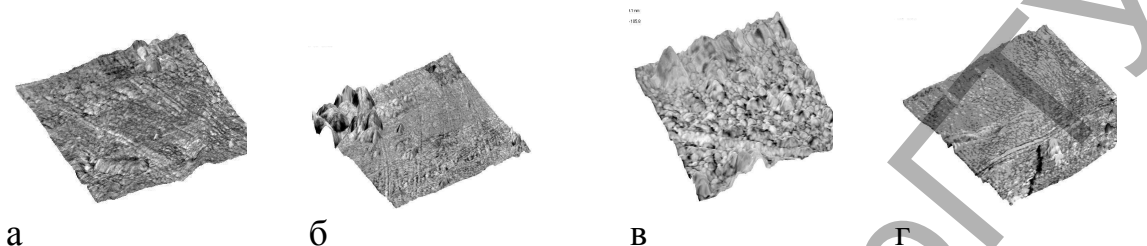


Рисунок 3 – 3-D вид АСМ-изображения поверхности пленки ПП: а - пленка ПП, не обработанная ЛИ; б - облучение ЛИ при $q=2,00 \text{ Вт/см}^2$; в - облучение ЛИ при $q=3,30 \text{ Вт/см}^2$; г - облучение ЛИ при $q=4,50 \text{ Вт/см}^2$

В результате проведенных исследований можно сделать выводы о том, лазерное облучение пленок приводит к структурным и морфологическим изменениям, причем установлено, что оптимальные режимы лазерной обработки для пленок ПЭВД и ПЭТФ соответствуют плотности мощности $4,50 \text{ Вт/см}^2$, для ПП пленок – $3,30 \text{ Вт/см}^2$. Данная обработка приводит к увеличению предела прочности при растяжении.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. ГОСТ 14236-81. Пленки полимерные. Метод испытания на растяжение. М.: Издательство стандартов, 1989, 10 с.

УДК 67.02

ОСОБЕННОСТИ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Кудрицкий Я.В., Ялковский Н.С.

Брестский государственный технический университет
Брест, Республика Беларусь

Главные особенности автоматизированного проектирования в технологии машиностроения – это многовариантность и низкий уровень формализации при решении большинства проектных задач.

В соответствии с этими особенностями, проектирование технологических процессов представляет собой, в основном, последовательный выбор типовых решений, в соответствии с определенными условиями производства и параметрами детали. Большое разнообразие переменных факторов, влияющих на выбор атрибутов техпроцесса, значительно усложняют автоматизацию технологической подготовки производства. Поэтому, целесообразно выполнить разделение

этапов проектирования, и представить процесс в виде многоуровневой структуры (рисунок 3). В результате такого разделения, процесс проектирования сводится к решению задач с различной степенью детализации на взаимосвязанных уровнях.

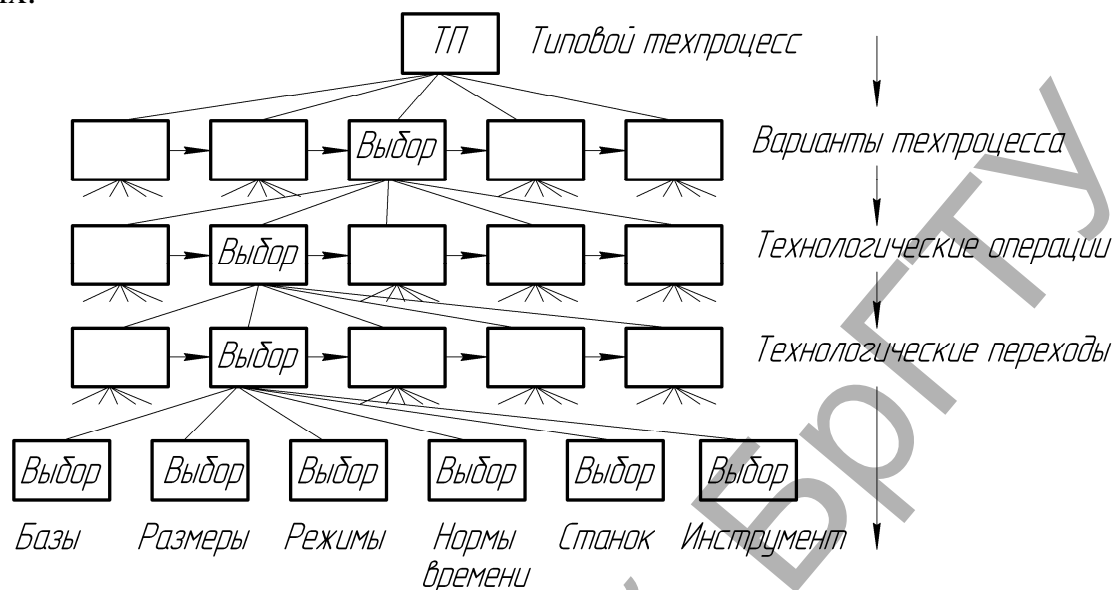


Рисунок 1 – Схема выбора варианта технологического процесса

По этой схеме (рисунок 1), промежуточные результаты могут использоваться в качестве исходных данных для следующего этапа проектирования. Это позволяет использовать на каждом уровне более простые модели и алгоритмы.

Рассмотрим вариант решения задачи выбора элементарного маршрута обработки типовых поверхностей по ряду условий.

При выборе методов обработки целесообразно пользоваться опытными данными с предприятий и справочными таблицами экономической точности обработки, в которых содержатся сведения о технологических возможностях различных методов обработки.

Необходимо учесть, что значения средней экономической точности и шероховатости даны при определенной и обязательной последовательности переходов обработки. В тех случаях, когда требуемая точность поверхности может быть достигнута разными методами обработки или разными их сочетаниями, следует выбирать наиболее короткий, производительный и экономичный вариант обработки. В любом случае, средняя экономическая точность обработки произвольной поверхности может быть достигнута рядом последовательных действий, каждое из которых характеризуется экономически обоснованной точностью, связанной с возможностями технологической подсистемы определенного уровня. Если параметры экономической обоснованной точности обработки связать со стандартным рядом допусков размеров, то каждое элементарное уточнение поверхности будет выполняться с определенным шагом. Единая система допусков и посадок построена так, что для одного интервала номинальных размеров допуски в соседних квалитетах и степенях точности отличаются в 1,6 раза. Поэтому, расчетные величины уточнений ϵ_n для определенных

технологических систем и типов обрабатываемых материалов можно определить из соотношений, например $\varepsilon_1 = 1,6 \dots 1,63 = 1,6 \dots 4,1$; $\varepsilon_2 = \varepsilon_3 = \dots \varepsilon_n = 1,6 \dots 1,62 = 1,6 \dots 2,56$, и т.д.

Такая интерпретация позволяет связать выбор необходимого элементарного маршрута обработки типовых поверхностей с таблицами допусков размеров, введя определенные коэффициенты уточнения, характеризующие переход от поверхности с более низкими показателями точности к поверхности с более высокими показателями.

При значительном количестве возможных результатов, целесообразно каждому промежуточному состоянию поверхности изначально присвоить свой числовой код. Тип и вид кода выбирается произвольно.

Например, могут рассматриваться следующее сочетание влияющих признаков:

1. Укрупненная характеристика метода обработки, отражающая порядок выполнения определенного перехода. Данному признаку можно присвоить цифровые индексы от 1 до...необходимого значения. Этот индекс в коде будет указан первым, и определять номер перехода в порядке выполнения.

2. Вторым укажем индекс подвида обработки, связанный с номером качества, например черновая (IT14) – 114; предварительная (IT13) – 113; предварительная или получистовая (IT12) – 112; получистовая, или чистовая (IT11) – 111 и т.д. Количество самих кодов и вторых индексов в коде будет соответствовать количеству возможных вариантов. Это связано с наличием диапазонов для коэффициентов уточнения K_u , что предполагает неоднозначность.

Например, при выполнении первого перехода механической обработки возможны следующие варианты: $\frac{\delta_c}{\delta_{11}}$; $\frac{\delta_c}{\delta_{12}}$; $\frac{\delta_c}{\delta_{13}}$; $\frac{\delta_c}{\delta_{14}}$. Соответственно, присваиваем коды: 111; 112; 113; 114 (т.е. первый переход + получаемая точность размера по K_u).

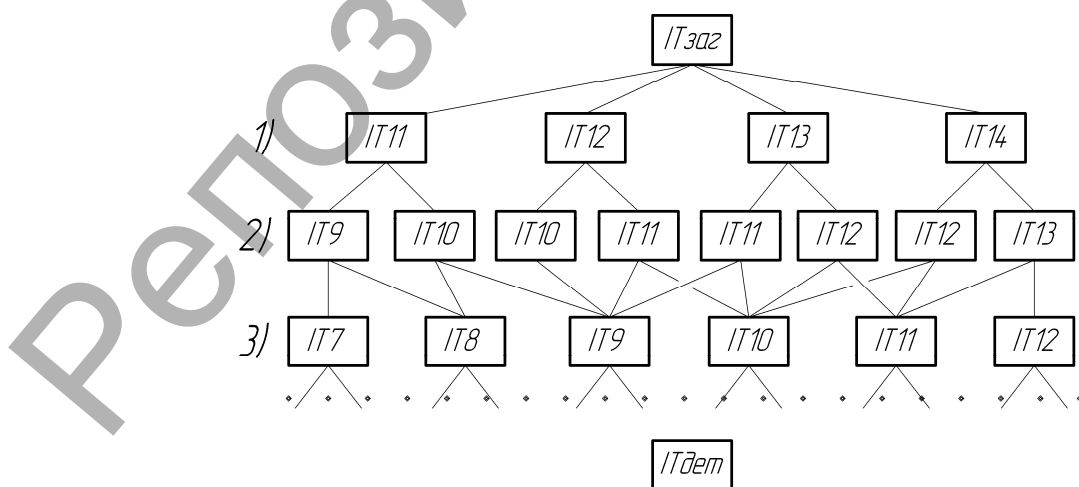


Рисунок 2 – Схема к определению количества и состава технологических переходов

Для вторых переходов варианты кодов будут: 2119; 21110; 21210; 21211; 21311; 21312; 21412; 21413. Аналогично можно записать коды для третьих и последующих переходов.

**ПРОГРАММА ВЫБОРА ЭЛЕМЕНТАРНОГО МАРШРУТА ОБРАБОТКИ
ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПО КОЭФФИЦИЕНТУ УТОЧНЕНИЯ**

Входные параметры

→ Обрабатываемый диаметр	$d =$ 50 мм	Если нет допуска, укажите качество
→ Допуск размера поверхности заготовки	$\delta =$ мм	→ Качество ИТ 17
→ Допуск размера поверхности детали	$\delta =$ мм	→ Качество ИТ 8

Уточненные стандартные величины допусков размеров поверхности заготовки и детали, мм по СІ СЭВ 144-75

$\delta_{зг} =$ 3 мм	Качество ИТ 17
$\delta_{дет} =$ 0,046 мм	Качество ИТ 8

→ Тип обрабатываемой поверхности (Наружная - код=1, Внутренняя - код=2) 1 - Наружная цилиндрическая поверхность

→ Обрабатываемый материал (Сталь - код=1, Чугун - код=2) 2 - Обрабатываемый материал - Чугун

ЭЛЕМЕНТАРНЫЙ МАРШРУТ ОБРАБОТКИ

Примечание: Расчет выполнен для максимально возможных параметров точности. Размер с меньшей точностью будет обеспечиваться гарантированно при выполнении расчетного количества переходов

Общее количество переходов -	3 (Расчетное количество)
переход операция №1	
Однократное или предварительное точение. Точность ИТ13.	
Точность размера после выполнения перехода, мм -	0,46
переход операция №2	
Чистовое точение. Точность ИТ10.	
Точность размера после выполнения перехода, мм -	0,12
переход операция №3	
Окончательное или полу-чистовое шлифование. Точность ИТ8.	
Точность размера после выполнения перехода, мм -	0,046

→ \Программа / Сводный / Расчет для стали / Расчет для чугуна / Таблица допусков /

Рисунок 3 – Вариант представления результатов расчета

Данный метод позволяет выполнять расчёт по каждому критерию отдельно. После решения частных задач в каждом из блоков выполняем объединение результатов в один итоговый результат. Вариант представления итогового результата – типовой маршрут обработки с указанием параметров точности обрабатываемых поверхностей, получаемых на соответствующих этапах.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Проектирование технологий машиностроения на ЭВМ: Учебник для вузов/ О.В. Таратынов, Б.М. Базров, В.В. Клепиков и др.; Под ред. О.В. Таратынова. – М.: МГИУ, 2006. – 519
2. Справочник технолога-машиностроителя. Том 1 / Под ред. А. М. Дальского, А. Г. Косиловой, Р. К. Мещерякова, А. Г. Сулова, М.: Машиностроение–1, 2001, 912 с.
3. Справочник технолога-машиностроителя. Том 2 / Под ред. А. М. Дальского, А. Г. Косиловой, Р. К. Мещерякова, А. Г. Сулова, М.: Машиностроение –1, 2001, 944 с.

УДК 621

ИССЛЕДОВАНИЕ И НАУЧНОЕ ОБОСНОВАНИЕ РАЗРУШЕНИЯ УЗЛА ПРИВОДА ГЛАВНОГО ДВИЖЕНИЯ ГИБОЧНОГО СТАНКА С ЧПУ

Добрияник Ю.А.¹

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

За последние четыре года эксплуатации гибочного станка происходили неоднократные разрывы вала (рисунок 1) гидроцилиндра ПГД. Предприятие СООО "СтальПродукт-Инвест" специализируется на изготовлении и производстве оборудования для нужд мясо-молочной промышленности и аграрной от-

расли из нержавеющей стали в Республике Беларусь. Данный вид оборудования на предприятии работает в две смены и при полной загрузке, поэтому его поломки, а соответственно и незапланированные простои обходятся достаточно дорого. После первой поломки были приглашены специалисты с сервисного центра (г. Минск), которые поменяли вал, однако через полгода вал разорвало снова. Для выяснения причины разрушения данного узла учебно-производственными мастерскими совместно с кафедрой машиноведения был проведен полный системный анализ и в дальнейшем сделаны соответствующие выводы.

При помощи Autodesk Inventor Professional получили точные физические параметры вала ПГД, которые в дальнейшем использовали для дальнейшего анализа:

$$m = 6,40631 \text{ кг}, S = 91233,5 \text{ мм}^2, V = 816090 \text{ мм}^3$$

центр масс $x=-74,5803\text{мм}$; $y=34,0596\text{мм}$; $z=-33,8386 \text{ мм}$, $\rho=7,85 \text{ г/см}^3$, $\sigma_p = 448\text{МПа}$. $\sigma_T = 275,8 \text{ МПа}$, $E = 200\text{ГПа}$. Материал вала – сталь 40Х (ГОСТ4543-71) – это конструкционная легированная сталь, содержащая от 0,36% до 0,44% углерода и хрома в интервале от 0,8% до 1,1% [1]. Эквивалентами стали 40Х являются стали: 45Х, 38ХА, 40ХН, 40ХС, 40ХФ, 40ХР. Область применения этой стали довольно разнообразен, хоть и сводится в большинстве своем к созданию из неё деталей вращения таких как: валы, оси, плунжеры, вал-шестерни, штоки, колленчатые и кулачковые валы, кольца, рейки, шпиндели, зубчатые венцы, оправки, полуоси, втулки и многие другие детали повышенной прочности, подвергающихся улучшению [1]. Для данного оборудования настройка стопорных гаек имеет ключевое значение, так как в зависимости от их высотного положения настраивается высота опускания рабочего органа станка, что влияет на угол загиба материала. Настройка осуществляется за счет электродвигателя, кинематически связанного с исследуемым валом. Принципиальная схема приведена на рисунке 1.

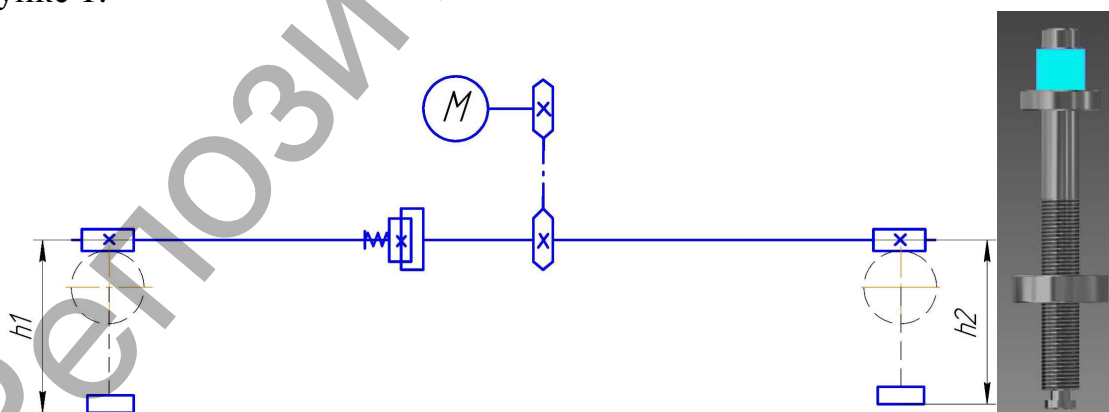


Рисунок 1 – Упрощенная кинематическая схема настройки и поверхность закрепления вала

Системный анализ был проведен при помощи программы Autodesk Inventor Professional [2] путем приложения максимально возможной нагрузки равной 160 кН для проверки его на растяжение, а так же приложение угловой силы к стопорной гайке для проверки данного вала на изгиб. Исходя из конструкции

данного станка, поверхностью закрепления вала является верхняя ступень вала диаметром 50 мм (рисунок 1).

Проведем три вида нагружения и исследуем каждый из них. В первом случае нагружение было проведено, когда стопорная гайка была в крайнем верхнем положении относительно резьбы (рисунок 2) и полученные результаты занесем в таблицу 1. Второй случай – при среднем расположении гайки (рисунок 3), и третий – при нижнем расположении стопорной гайки, результаты сводим в таблицу 1.

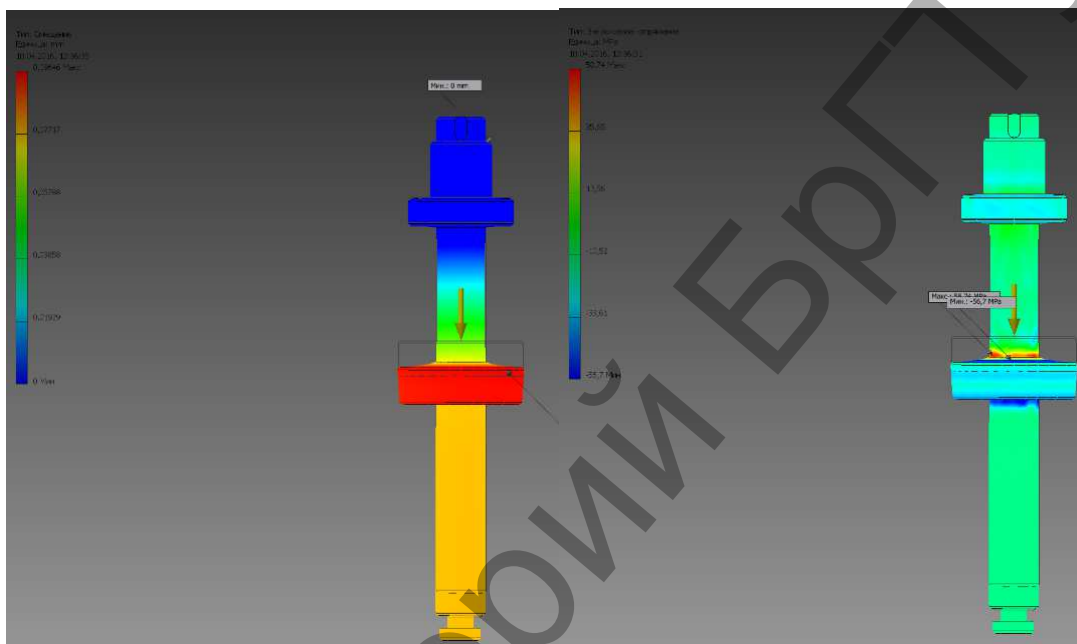


Рисунок 2 – Проверка на растяжение при верхнем расположении гайки

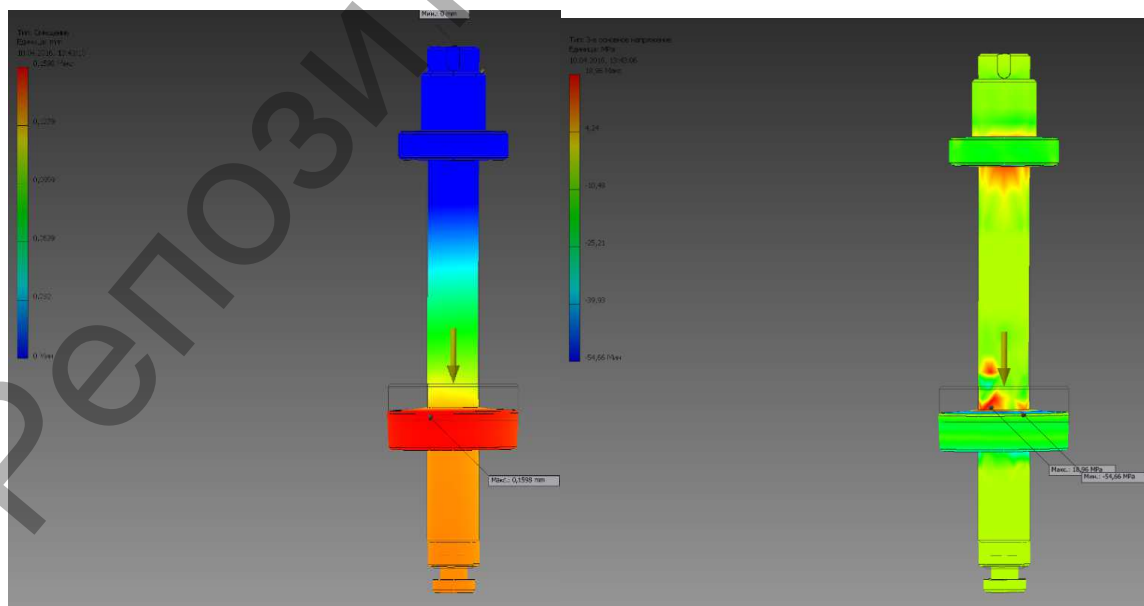


Рисунок 3 – Проверка на растяжение при среднем расположении стопорной гайки

Таблица 1 – Результаты при проверке на растяжение

Масса	6,40631 кг					
Вид нагружения	Верхнее		Среднее		Нижнее	
Напряжение по Мизесу	0,000078944 МПа	222,819 МПа	0,000215362 МПа	200,1 МПа	0,0947276 МПа	167,513 МПа
1-е осн. напряжение	-8,01257 МПа	294,063 МПа	-3,8076 МПа	220,821 МПа	-13,9762 МПа	193,483 МПа
3-е осн. напряжение	-56,7042 МПа	58,7441 МПа	-54,6554 МПа	18,9635 МПа	-87,5055 МПа	27,0866 МПа
Смещение	0 мм	0,096459 мм	0 мм	0,159821 мм	0 мм	0,22152 мм
Коэффициент запаса прочности	1,23778 бр	15 бр	1,37831 бр	15 бр	1,64644 бр	15 бр
Напряжение XX	-43,1783 МПа	90,7164 МПа	-43,5078 МПа	36,412 МПа	-74,426 МПа	46,1714 МПа
Напряжение XY	-14,2831 МПа	12,6937 МПа	-12,8712 МПа	14,0255 МПа	-13,88 МПа	13,9055 МПа
Напряжение XZ	-55,5864 МПа	67,6141 МПа	-30,7396 МПа	31,5994 МПа	-36,3161 МПа	33,2569 МПа
Напряжение YY	-43,277 МПа	93,2522 МПа	-43,6328 МПа	32,2625 МПа	-73,3994 МПа	46,9474 МПа
Напряжение YZ	-55,3005 МПа	47,5817 МПа	-31,3813 МПа	29,4963 МПа	-27,8113 МПа	31,3453 МПа
Напряжение ZZ	-56,195 МПа	263,465 МПа	-54,202 МПа	219,247 МПа	-53,2075 МПа	190,165 МПа
Смещение по оси X	-0,00420377 мм	0,00635479 мм	-0,00388557 мм	0,0090181 мм	-0,00336677 мм	0,0329037 мм
Смещение по оси Y	-0,00727385 мм	0,00352641 мм	-0,0254857 мм	0,0035926 мм	-0,0100932 мм	0,00370659 мм
Смещение по оси Z	-0,0964363 мм	0 мм	-0,159719 мм	0 мм	-0,220067 мм	0 мм
Контактное давление	0 МПа	465,028 МПа	0 МПа	530,816 МПа	0 МПа	507,327 МПа
Конт. давление по оси X	-306,164 МПа	229,778 МПа	-304,452 МПа	261,401 МПа	-281,278 МПа	239,82 МПа
Конт. давление по оси Y	-302,854 МПа	309,842 МПа	-326,078 МПа	356,396 МПа	-334,109 МПа	344,694 МПа
Конт. давление по оси Z	-333,48 МПа	44,413 МПа	-373,335 МПа	69,7322 МПа	-337,48 МПа	40,2446 МПа

Далее проверим вал на изгиб, что наблюдается во время работы станка при неправильной регулировке стопорных гаек. Нагружение было проведено под углом относительно оси вала, так как мы предполагаем что гайки были выставлены на разные высоты относительно друг друга, что в следствии и вызывало изгиб вала (рисунок 4). Результаты сведем в таблицу 2.

В ходе проведенного анализа можно сделать вывод, что вал не получает значительных смещений и деформаций при нагружении его вдоль оси. Однако, при неправильной регулировке стопорных гаек, сила начинает действовать на изгиб, что в данном случае повлечет за собой увеличение напряжения в 5 раз относительно нормального действия силы, что и приводит к разрыву вала вследствие циклических нагрузок (54,7 МПа против 232,2 МПа). Данные компьютерного моделирования полностью соответствуют натурному образцу вала после разрыва, следовательно, неправильная настройка данных гаек значительно сокращает срок эксплуатации исследуемого вала ПГД станка и основной упор в данном случае необходимо сделать на точную регулировку гаек, своевременную замену износившихся матриц и пуансонов и неукоснительное соблюдение организационно-технических мероприятий по проведению ППР.

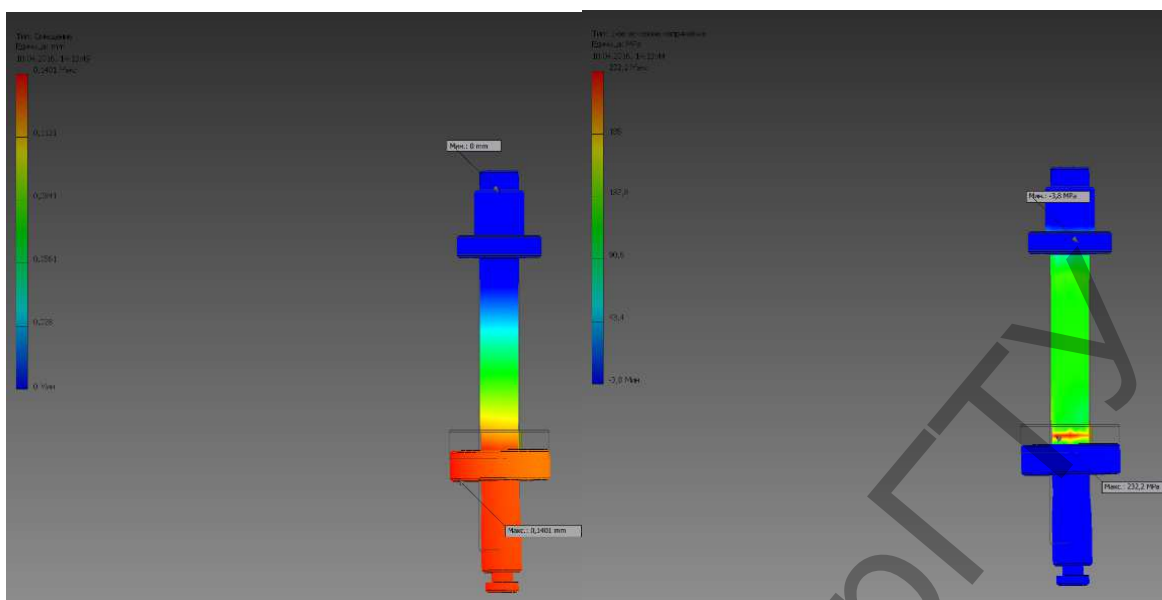


Рисунок 4 – Проверка на изгиб

Таблица 2 – Результаты при проверке на изгиб

	Минимальная	Максимальная
Напряжение по Мизесу	0,000190109 МПа	214,338 МПа
1-ое основное напряжение	-3,82513 МПа	232,168 МПа
3-е основное напряжение	-37,0915 МПа	20,0892 МПа
Смещение	0 мм	0,140139 мм
Напряжение XX	-17,8381 МПа	32,5293 МПа
Напряжение XY	-16,806 МПа	17,075 МПа
Напряжение XZ	-34,9543 МПа	31,7315 МПа
Напряжение YY	-16,474 МПа	44,1928 МПа
Напряжение YZ	-41,644 МПа	41,2042 МПа
Напряжение ZZ	-31,5924 МПа	231,215 МПа
Смещение по оси X	-0,0119487 мм	0,00633407 мм
Смещение по оси Y	-0,0202454 мм	0,00384183 мм
Смещение по оси Z	-0,139945 мм	0 мм
Контактное давление по оси X	-28,6105 МПа	20,4407 МПа
Контактное давление по оси Y	-19,7386 МПа	18,9519 МПа
Контактное давление по оси Z	-1023,46 МПа	292,862 МПа

Экономический эффект от внедрения данной методики на предприятии ООО "СтальПродукт-Инвест" составил 18 млн. руб.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Лахтин Ю. М., Леонтьева В. П. Материаловедение: Учебник для машиностроительных вузов. – 2-е изд., перер. и доп. – М.: Машиностроение. 1980. – 493 с.
2. Том Трембли. Autodesk Inventor 2013 и Inventor LT 2013. Основы. Официальный учебный курс. – ДМК-Пресс. 2013. – 344 с.

ВЛИЯНИЕ КРИОГЕННОЙ ОБРАБОТКИ НА СТРУКТУРУ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МЕТАЛЛООБРАБАТЫВАЮЩЕГО ИНСТРУМЕНТА

Гаврилова В.В., Казьмин А.А.

Гродненский государственный университет имени Янки Купалы,
Гродно, Республика Беларусь

Одним из главных факторов повышения эффективности производства является повышение долговечности металлообрабатывающего инструмента за счет увеличения износостойкости, надежности и производительности. К универсальным методам повышения работоспособности металлообрабатывающих инструментов можно отнести криогенную обработку и поверхностное пластическое деформирование. Кроме универсальности методы следует рассматривать с позиции экологической чистоты. К таковым относятся криогенная технология [1]. Температура кипения жидкого азота является оптимальной с точки зрения повышения параметров физико-механических характеристик инструментальных сталей.

Цель работы – исследование структурных превращений и изменения параметров физико-механических и триботехнических характеристик металлообрабатывающего инструмента под влиянием криогенной обработки.

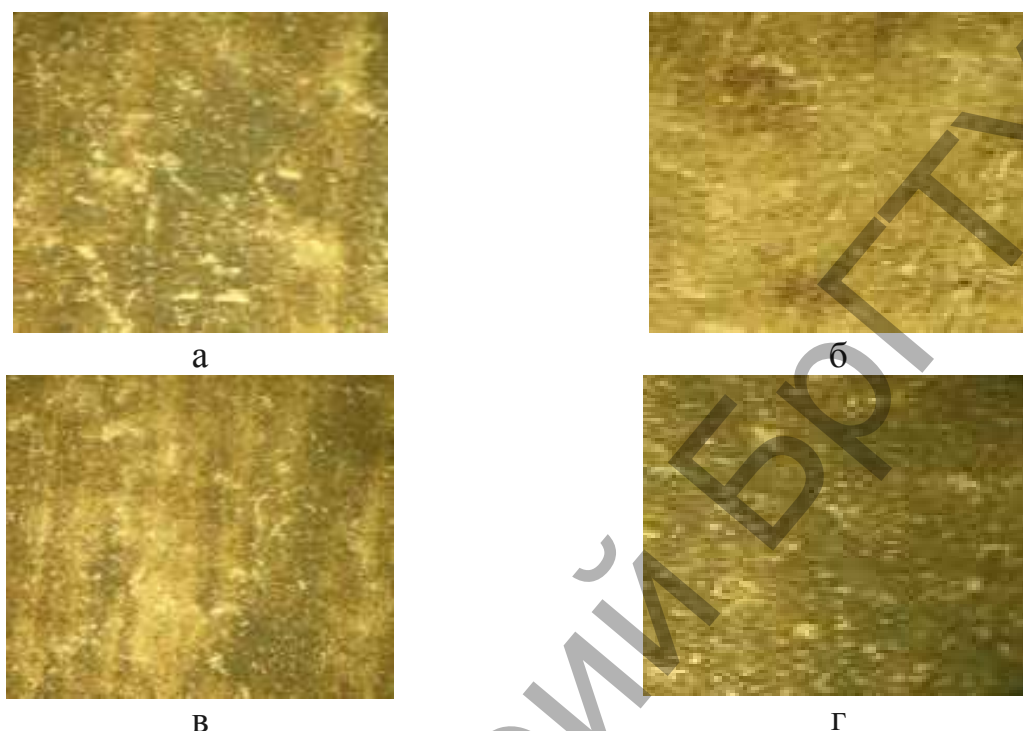
Для испытаний выбрали быстрорежущую сталь марки Р6М5 после стандартной термической обработки. Подготовили образцы в виде дисков диаметром 60 мм толщиной 5 мм. Поверхность образцов шлифовали и полировали до шероховатости R_z 0,25 мкм. Изготовили четыре образца. Образец № 1 оставили в исходном состоянии. Образцы №№ 2, 3, 4 обработали в жидком азоте с различным временем выдержки – 15, 30 и 60 минут.

Структурные превращения в стали после криогенной обработки исследовали на инверсном металлографическом микроскопе ММР-1600Т с увеличением до $500\times$. Микротвердость покрытия определяли на микротвердомере "CV400ААТ". Триботехнические испытания проводили на микротрибометре FT-2, по схеме «сфера-плоскость» при следующих режимах: $p = 20\text{Н}$, $n = 120$ об/мин. Для тестовых испытаний в качестве режущего инструмента выбрали сверла диаметром 5 мм из стали Р6М5 в исходном состоянии и после выдержки в жидком азоте 15, 30 и 60 минут. Тестовые испытания режущего инструмента проводили, обрабатывая в пружине привода масляного выключателя отверстия на станке марки E1516B/400.

Анализ изображений поверхности сталей, полученных методом оптической микроскопии (рисунок 1) свидетельствует о том, что криогенная обработка уменьшает размеры карбидов и устраняет неравномерность их распределения (рисунок 1, б, в). Карбидная фаза приобретает мелкодисперсную глобулярную форму (рисунок 1, г).

Результаты триботехнических испытаний представлены на рисунке 2. Как следует из экспериментальных данных, при увеличении времени выдержки ме-

таллорезущего инструмента в жидком азоте уменьшается коэффициент трения. Самый низкий коэффициент трения наблюдается при обработке подложки в жидком азоте течение 60 минут, а самый высокий соответствует трению подложки без криогенной обработки.



а – сталь P6M5 исходная; б – сталь P6M5 с криогенной обработкой 15 минут; в – сталь P6M5 с криогенной обработкой 30 минут; г – сталь P6M5 с криогенной обработкой 60 минут

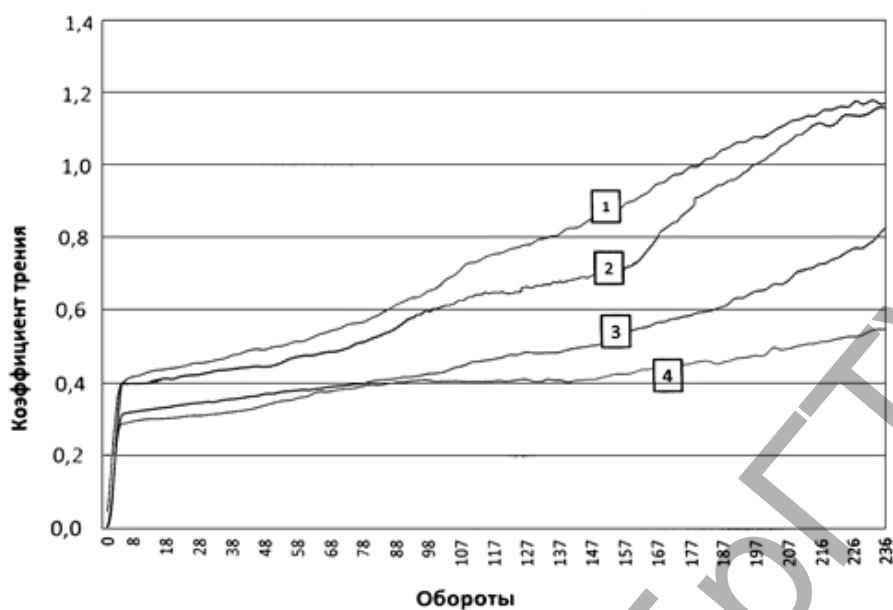
Рисунок 1 – Микроструктура образцов при увеличении 500^х

При проверке стали P6M5 на твердость выяснили, что увеличение времени выдержки образцов в жидком азоте до 60 минут приводит к значительному увеличению параметра микротвердости. Микротвердость инструмента по HV, обработанного в азоте в течение 60 минут, на 110 единиц больше микротвердости инструмента, не прошедшего криогенную обработку.

Тестовые испытания показали, что режущий инструмент с криогенной обработкой может работать на более высоких режимах и с большой стойкостью по сравнению с инструментом без криогенной обработки. Стойкость инструмента после криогенной обработки в течение 60 минут увеличилась в 2 раза (таблица 1).

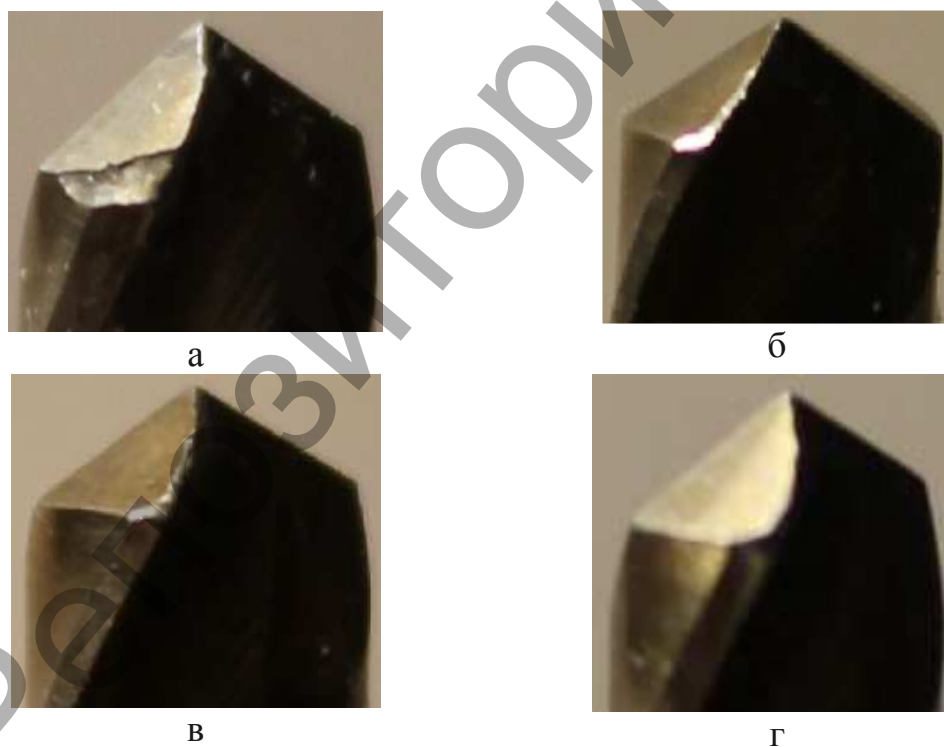
На рисунке 3 представлен вид режущих кромок после тестовых испытаний. Показано, что режущая кромка исходного сверла значительно изношена, видны сколы.

По мере увеличения времени обработки холодом наблюдается уменьшение износа режущих кромок. После криогенной обработки в течение 60 минут кромка сверла практически не изношена.



1 – сталь Р6М5; 2 – сталь Р6М5+криообработка в течение 15 минут; 3 – сталь Р6М5+криообработка в течение 30 минут; 4 – сталь Р6М5+криообработка в течение 60 минут

Рисунок 2 – Значения коэффициента трения



а – сверло из стали Р6М5; б – сверло после криогенной обработки в течение 15 минут; в – сверло после криогенной обработки в течение 30 минут; г – сверло после криогенной обработки в течение 60 минут

Рисунок 3 – Режущие кромки сверл после тестовых испытаний при увеличении 10^{\times}

Таблица 1 – Результаты тестовых испытаний

Образец	Режимы сверления		Стойкость сверла до первой заточки, количество деталей
	Число оборотов n , об/мин	Подача S , мм/мин	
Сверло из стали P6M5	250	25	40
Сверло из стали P6M5 после криогенной обработки в течение 15 минут	250	35	60
Сверло из стали P6M5 после криогенной обработки в течение 30 минут	250	40	70
Сверло из стали P6M5 после криогенной обработки в течение 60 минут	250	45	72

Из работы можно сделать вывод, что криогенная обработка позволяет улучшить эксплуатационные характеристики металлорежущих инструментов, повысить их износостойкость и твердость. Испытания показали, что оптимальное время выдержки инструмента в жидком азоте составляет 60 минут.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Соломенцев, Ю.М. Применение криогенных технологий для повышения стойкости инструментов // Приложение к журн. «Инструмент. Технология. Оборудование». – 2001. – № 2 – С.7.

УДК 621.09

ОЦЕНКА РЕСУРСА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ С ЧПУ ПО ПАРАМЕТРАМ ТОЧНОСТИ ТРАЕКТОРИИ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ

Горбунов В.П., Григорьев В.Ф., Дакало Ю.А.

Брестский государственный технический университет
Брест, Республика Беларусь

Технологическое оборудование с ЧПУ представляет собой сложное, дорогостоящее оборудование, эффективность использования которого является актуальной задачей для каждого машиностроительного предприятия. В процессе эксплуатации под влиянием вредных воздействий происходит изменение параметров траектории перемещения рабочих органов несущих заготовку и инструмент, что влияет на точность выходных параметров станка. Сохранение точности и безотказности работы оборудования в течение всего периода его эксплуатации обеспечивается системой его технического обслуживания и ремонта (ТОиР). Рациональная система ТОиР должна обеспечивать предупреждение всех видов отказов, как параметрических, так и функционирования, при наиболее полном использовании потенциальных сроков службы деталей и узлов оборудования [1].

Различают ремонтные работы «по потребности», когда оборудование вышло из строя в результате достижения предельного состояния выходного параметра или поломки, и по плану, не дожидаясь выхода оборудования из строя, когда износ деталей еще не достиг предельной величины, при которой оно уже не может выполнять свои функции или дальнейшая его эксплуатация является опасной или нерентабельной. Ремонт машин по плану называют планово-предупредительным [2]. Целью планово-предупредительного ремонта (ППР) является не восстановление работоспособности вышедшего из строя оборудования, как это имеет место при ремонте по потребности, а предупреждение неожиданного для производства выхода его из строя. Это достигается с наибольшим экономическим эффектом в том случае, когда обеспечивается достаточно близкое соответствие планируемых сроков выполнения ремонтных работ и времени возникновения действительной необходимости в них, а также плановых объемов ремонтов фактическим требующимся. В противном случае неизбежны производственные издержки, вызванные необоснованными простоями оборудования и большими расходами на ППР.

В настоящее время на промышленных предприятиях применяются рекомендуемые нормативы межремонтных периодов для разных видов оборудования [2]. Однако эти нормативы являются статистически средневзвешенными. В зависимости от условий эксплуатации оборудования на конкретном предприятии, применяемых методов и условий ремонта, а также достигнутого уровня качества плановых ремонтов, от них необходимо делать отступления в ту или другую сторону. Оптимизация межремонтных периодов возможна на основе моделирования влияния вредных процессов, а также разработки критерия нормальности объема ремонтных работ. Для формирования графиков ППР сегодня используется специализированное программное обеспечение, предназначенное для информационной поддержки ТОиР [3]. Использование технологического оборудование с ЧПУ, в первую очередь многоцелевых станков (МС) – характеризующихся высокой стоимостью, многономенклатурной обработкой и высокой производительностью, ставит задачу внедрения системы ремонта по фактическому состоянию. Оборудование останавливают для планово-предупредительного ремонта, когда оно еще вполне работоспособно. В этом случае рекомендуется применять средства и методы диагностирования и прогнозирования состояния, как всего оборудования, так и отдельных систем и узлов. В работе [4] предложен метод функциональной диагностики станков, где для сокращения временных затрат разработаны программные средства, позволяющие автоматизировать процесс диагностики. При этом оценка геометрических параметров точности токарного и вертикально-фрезерного станков производится по параметрам обрабатываемых поверхностей эталонных деталей.

Основными выходными параметрами точности станков, формирующие качественные характеристики обрабатываемых деталей, являются траектории перемещения их формообразующих узлов. Методическим и информационным обеспечением диагностирования и прогнозирования изменений параметров

траекторий является программный метод испытаний станков (ПМИ), предложенный профессором Прониковым А.С., который позволяет диагностировать текущее состояние станка, прогнозировать его технологическое состояние и вносить обоснованные коррективы в технологические задачи, решаемые с его применением или планировать необходимые ремонтно-профилактические работы [5].

В отличие от тепловых деформаций, которые проявляются в межналадочном периоде эксплуатации и являются обратимыми, за длительный срок службы станка основной причиной потери работоспособности по параметрам траекторий перемещения является износ. Изнашивание характерно для таких ответственных сопряжений станков, как направляющие скольжения, ходовые винты, гайки, кулачковые механизмы, фрикционные муфты и др. Износ сопряжения является характеристикой, которая непосредственно связана с потерей работоспособности станком или механизмом. В этой связи важно как можно более точно определить ресурс станка, связанного с потерей точности (ресурс станка по точности). Для станков, находящихся в эксплуатации ресурс по точности определяется как с использованием стандартных средств контроля, диагностики, так и методами статистического моделирования.

Установление предельно допустимых значений износа является чрезвычайно сложной задачей, так как к деталям любого станка предъявляются самые разнообразные требования. Методика расчета предельных износов разработана еще недостаточно. Однако при каждом ремонте машины необходимо решить вопрос о возможности дальнейшей работы изношенных деталей. При занижении значений предельных износов происходит недоиспользование сроков службы деталей, а при их завышении происходит рост аварийных ремонтов, что приводит к увеличению простоев станка и затрат на его ремонт. Поэтому основным признаком оценки качества поверхностей является своевременное измерение износа, что позволяет объективно оценить применяемые методы эксплуатации станка. Измерение износа поверхностей может производиться в период плановых ремонтов специально, при плановых осмотрах. ~~Первоначальной задачей при расчете предельных износов и, соответственно, сроков службы деталей и узлов является установление критериев (признаков) предельного износа. Эти критерии можно установить в зависимости от того влияния, которое оказывает износ детали на работу машины.~~

Выделяют три группы критериев, определяющих значение предельно допустимого износа [1]:

1) в результате износа до величины U_{\max} происходит отказ функционирования станка (поломка детали, заклинивание механизма или невыполнение своих функций);

2) износ при значениях $U > U_{\max}$ приводит к попаданию станка и узлов в зону интенсивного выхода из строя (возникают удары, происходит интенсивное изнашивание поверхностей, вибрации, повышается температура узлов и т.д.);

3) в результате износа на величину $U \leq U_{\max}$ параметры станка выходят за допустимые или рекомендуемые пределы (ухудшается качество продукции, понижается производительность, падает КПД, увеличивается шум).

Для станков в целом наиболее характерен отказ, связанный с критериями третьей группы, и в первую очередь, с выходом параметров точности за допустимые пределы. В этом случае необходимо установить зависимость между износом U отдельных сопряжений и изменением входных параметров станка.

Предельно допустимый износ U_{\max} определяет ресурс работы детали или станка в целом.

На рисунке 1 представлена кривая износа направляющих токарного станка мод.16К20Ф3, полученная по искажению траектории линейного перемещения суппорта. По зависимости, представленной в работе [1], между величиной износа U и точностью обработки $\Delta = U \cdot L / 320$ максимальное отклонение размера (диаметра) составит для длины обработки $L = 300$ мм на участке $0 \dots 600$ мм $\Delta_{\max} = 75 \dots 28$ мкм.

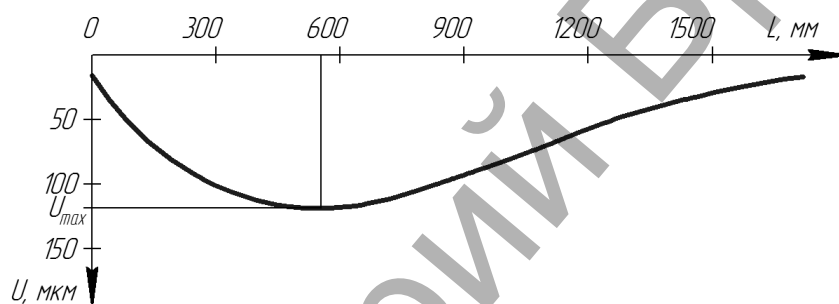


Рисунок 1 - Форма изношенной поверхности направляющих токарного станка в вертикальной плоскости

Для прогнозирования потери станком работоспособности с учётом износа отдельных сопряжений и механизмов необходимо осуществить следующие этапы:

- на основании закономерностей процесса изнашивания рассчитать износ сопряжения с данными конструктивными особенностями, определить форму изношенных поверхностей;
- оценить влияние износа сопряжений на выходные параметры станка;
- учесть вероятностную природу всех процессов и факторов (оценить их законы распределения);
- используя модель параметрического отказа, рассчитать показатели надёжности станка.

Знание физической закономерности процесса изнашивания, которой подчиняются материалы сопряжений пары, является необходимым, но недостаточным условием для прогнозирования изменения выходных параметров технологического оборудования в процессе эксплуатации. Необходимо иметь методы расчета износа сопряженных поверхностей механизмов различных конструктивных форм и оценки влияния этого износа на выходные параметры технологического оборудования с учетом случайной природы процесса изнашивания. Такие методы разработаны в теории надежности машин [1].

Можно выделить следующие основные этапы прогнозирования надежности при использовании программного метода испытания:

- варьируемые параметры, конкретные значения которых устанавливаются для каждого цикла испытаний, вводятся в принятый закон изнашивания;

- на основании расчета определяется форма изношенных поверхностей трения $U(x)$ и износ всего сопряжения;

- знание формы изношенных поверхностей даст возможность рассчитать величину изменения параметра $\Delta X = X_T - X_H$ от начального значения параметра X_H до текущего X_T за период времени Δt и скорость γ_x изменений координат траекторий опорных точек данного узла (рисунок 2);

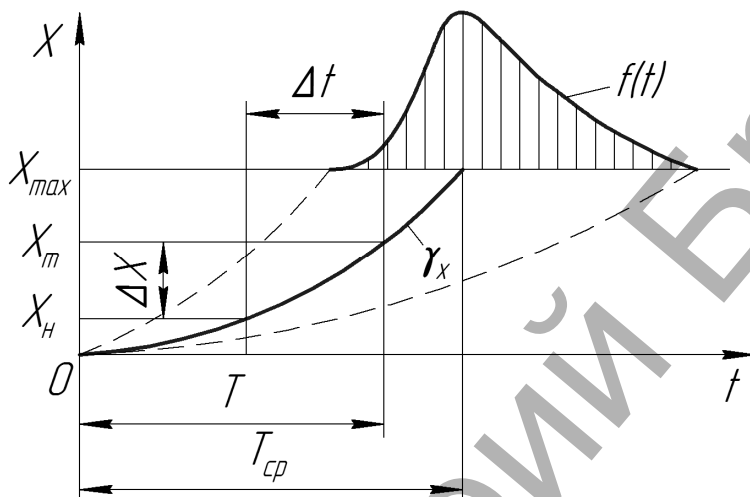


Рисунок 2 - Схема изменения выходного

- если известно изменение формы траектории опорной точки, то можно определить и величину или скорость изменений γ_x установленных выходных параметров X , поскольку они зависят от положения или формы траектории.

В результате для каждого выходного параметра X получим при данном n -ом цикле испытаний одно расчетное значение скорости изменения параметра γ_x , которое соответствует принятой комбинации входных параметров. Повторяя эти расчеты для всех N циклов, получим гистограмму распределения (которую можно аппроксимировать тем или иным законом распределения $f(\gamma_x)$), т.е. характеристику γ_x как случайной величины;

- после проведения всех процедур будут накоплены необходимые данные для расчета надежности ТО по выходным параметрам:

- а) область состояний и ее вероятностные характеристики для нового ТО, полученные в результате испытания;

- б) вероятностные характеристики изменения выходных параметров, найденные путем расчета.

Использованием компьютерной техники, активных методов и средств контроля обеспечивают возможность не только определять текущее состояние узлов путем измерения параметров траекторий движения формообразующих узлов, но и на основе их анализа прогнозировать остаточный ресурс узлов и деталей, планировать сроки проведения и объемы ремонтных работ только необхо-

димых агрегатов и узлов. Преимуществом такого планирования является снижение объемов ремонтных работ (исключается ремонт бездефектных узлов) и увеличение на 25-40% межремонтного ресурса по сравнению с ППР.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Проников, А.С. Надежность машин. М.: Машиностроение, 1978. – 592 с.
2. Типовая схема технического обслуживания и ремонта металло- и деревообрабатывающего оборудования / Минстанкопром СССР, ЭНИМС. М.: Машиностроение, 1988. – 672 с.
3. Анцева, Н.В. Управление системой планово предупредительного ремонта металлорежущих станков по критерию эксплуатационной технологичности / Н.В.Анцева, А.Н.Иноземцев // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки, 2013. Вып.12 (41). С.21–30.
4. Анিকেева, О.В. Автоматизация диагностирования и прогнозирования состояния металлорежущих станков на промышленных предприятиях / О.В.Аникеева, А.Н.Афонин, А.Г.Ивахненко // Известия Юг.-Зап. ГУ, 2012, №1 (40). С.103–107.
5. Васильев, Г.Н. Обеспечение технологической надежности токарных станков мониторингом параметров траекторий перемещения суппортных узлов / Г.Н.Васильев, А.Г.Ягопольский // Вестник МГТУ им. Н.Э.Баумана. Сер. Машиностроение, 2010. №2. С. 91 – 105

УДК 62-1:664.9

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНИКИ И ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ СУБПРОДУКТОВ

Ляшук Н. У., Титовец Р.А.

Брестский государственный технический университет,
Брест, Республика Беларусь

Субпродукты (далее с/п) - это внутренние органы и части животного организма, получаемые при переработке скота. В зависимости от вида сельскохозяйственных животных с/п подразделяются по видам: говяжьи; бараньи; свиные, конские. В зависимости от особенностей морфологического строения и способов обработки с/п подразделяют на 4 группы: мякотные, мясокостные, слизистые, шерстные.

В СССР насчитывалось порядка 1200 мясоперерабатывающих предприятий (мясокомбинаты, мясожировые и мясоперерабатывающие производства). Все они были оснащены центрифугами (далее ЦТФ) для обработки шерстных и (далее Ш.) и слизистых (далее С.) с/п моделей Гб-ФЦШ и Гб-ФЦС, то есть, центрифугами одного типа.

В РБ имеется 23 мясокомбината, в состав которых входят мясожировые производства с участками обработки с/п. В настоящее время на мясокомбинатах выполняются работы по модернизации и реконструкции мясожировых производств, с применением комплексных технологических линий различной мощности импортного производства. Кроме того в каждом райцентре имеются мясожировые производства, находящиеся в подчинении Белкоопсоюза. Это свыше 120 предприятий, которые относятся к предприятиям малой мощности. Почти каждое крупное животноводческое хозяйство имеет свой мясожировой цех. Создаются частные мясожировые предприятия.

Сегодня в РФ создаются новые животноводческие предприятия, при которых строятся мясожировые производства различной мощности от 16 голов свиной до 400 в час и от 5 голов КРС до 100 голов в час, для которых необходимы ЦТФ различных типоразмеров,

В СНГ четыре предприятия (все они находятся в РБ) выпускают ЦТФ по разовым заказам, в основном одного типоразмера для мясожировых производств малой мощности

В странах СНГ обработка с/п производится на мясожировом производстве. Обработанные с/п поступают либо на реализацию в торговую сеть, либо в субпродуктовый цех на переработку, где из них изготавливают ливерные и кровяные колбасы, паштеты, зельцы и сальтисоны, холодец и др. Эта продукция пользуется спросом у населения, особенно в странах СНГ.

В Европейском Союзе запрещается обрабатывать Ш. и С. с/п на предприятии, где обрабатывается мясо, поэтому они отгружаются на утильзаводы или на специализированные предприятия для дальнейшей переработки. Поэтому в Европе изготавливаются ЦТФ, в основном, большой производительности.

Все ЦТФ для обработки с/п (отечественные и зарубежные) имеют одну и ту же конструктивную основу: неподвижный барабан и вращающийся в горизонтальной плоскости ротор. В отечественных ЦТФ применяется нерегулируемый привод ротора, а конструкция барабана и ротора одинакова: на внутренних стенках барабана и роторе приварены ребра. Отличия ЦТФ для обработки Ш. с/п от ЦТФ для обработки С с/п следующие: частота вращения ротора в ЦТФ для С. с/п больше чем в ЦТФ для Ш. с/п, а ребра в ЦТФ для обработки С. с/п выполнены с острыми кромками, а в ЦТФ для Ш. с/п закругленные. В импортных ЦТФ применяется регулируемый привод вращения ротора, а конструкция барабана и ротора различна для обработки с/п разных видов, учитывая процесс обработки сырья и влияние рабочих органов на структуру сырья при обработке.

Так, для обработки С. с/п, в основном, применяют 2 типа роторов: лучевой и абразивный. Лучевой ротор состоит из диска и обода, к которым приварены прутки из круглого металла. Абразивный состоящий из стальной чаши, заполненной мелкозернистым абразивом, имеющей выпуклые бугры на поверхности. Для обработки Ш. с/п, в основном, также применяют 2 типа роторов: лепестковый, состоящий из сплошного стального диска, на который наварены лепестки и ротор с наваренными под углом к оси ребрами.

Технический уровень выпускаемых в Республике Беларусь и странах СНГ ЦТФ для обработки с/п сегодня находится на уровне 60-70 годов прошлого столетия. Относительно простые по конструкции ЦТФ, которые отечественные машиностроительные предприятия могли бы освоить для обеспечения мясожировых предприятий нашей республики и поставки на огромный рынок стран СНГ, закупаются в Европе. Существующие ЦТФ, имея незначительные конструктивные различия между собой, изготавливаются и применяются отдельными моделями для обработки шерстных и слизистых субпродуктов.

Группой студентов машиностроительного факультета БрГТУ под руководством старшего преподавателя Ляшука Н.У. разработана универсальная ЦТФ для обработки с/п различных видов.

Универсальная ЦТФ состоит из станины 1, барабана 2, установленного на станине 1 с помощью шарнира 3 и прикрепленного к станине 1 прижимами 4, вращающегося в горизонтальной плоскости сменного ротора 5 и привода 6 (рисунок 2). Барабан 2 после освобождения прижимов 4 откидывается относительно шарнира 3 для обеспечения удобного доступа смены роторов 5 и для удобства выполнения санитарной обработки. Привод 6 состоит из мотор-редуктора 10 и приводного вала 11, установленного в подшипниках 12. Привод 6 закреплен к станине 1 соосно с барабаном 2. Сменный ротор 5 устанавливается на профильный конец приводного вала 11 и крепится одним болтом 13 и шайбой 14. Для каждого вида субпродукта в этих ЦТФ применяется комплект сменных роторов 5 различных конструкций, в которых выполнено посадочное отверстие, профиль которого соответствует профилю выходного конца приводного вала 11. Привод 6 - регулируемый, для обеспечения требуемой частоты вращения сменного ротора 5 для обработки каждого вида с/п (рисунок 1).

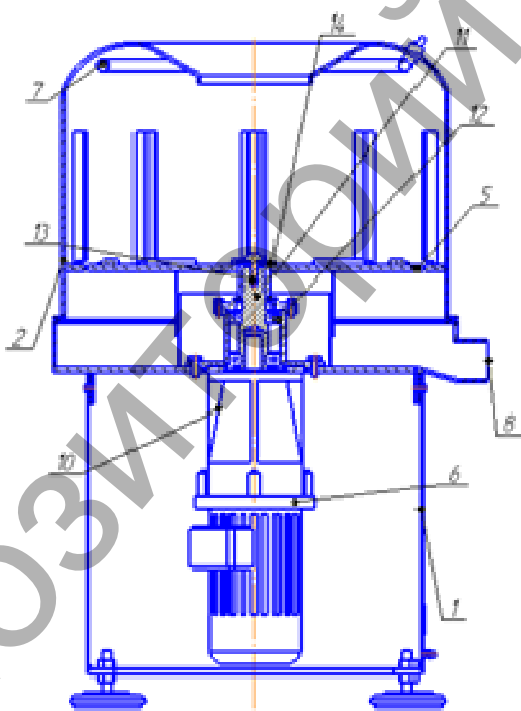


Рисунок 1 – Разрез центрифуги по оси барабана

Благодаря наличию сменных роторов различной конструкции для обработки с/п разных видов, имеющих профильное посадочное отверстие, приводу, содержащему приводной вал, свободный конец которого выполнен также профильным, соответственно профилю посадочного отверстия сменных роторов, а также устанавливать сменные роторы на приводной вал с возможностью крепления к нему одним болтом и шайбой, обеспечивается универсальность центрифуги при обработке субпродуктов разных видов.

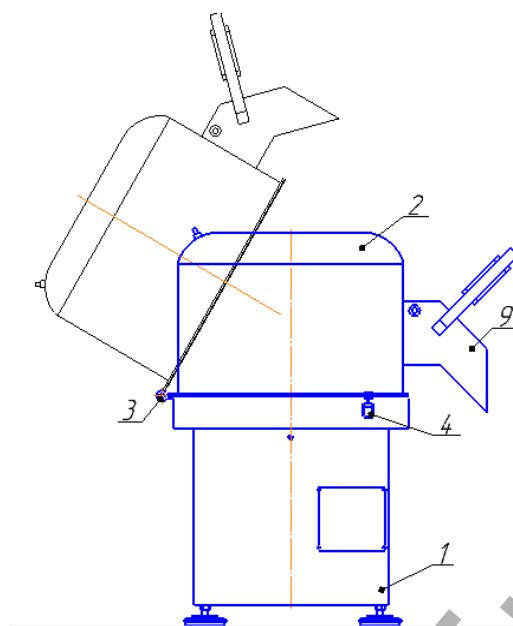


Рисунок 2 – Вид сбоку центрифуги

Предлагаемая универсальная ЦТФ позволит для мясожировых предприятий малой мощности обрабатывать все виды с/п, и заменит на мясожировых предприятиях малой мощности от 2-х до 5-ти ЦТФ, что обеспечит экономический эффект.

Подана заявка на полезную модель и получено решение Национального центра интеллектуальной собственности о выдаче патента. Машиностроительное предприятие ООО «ФИНА» (г. Брест) заинтересовано в серийном производстве данной ЦТФ.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Руководство по эксплуатации и обслуживания центрифуги для обработки шерстных субпродуктов модели D45 компании «Ollarie & Conti» (Италия) 2010 года выпуска.
2. Руководство по эксплуатации и обслуживания автоматической линии для обработки слизистых субпродуктов модели «P35 + R30 inline» компании «Ollarie & Conti» (Италия) 2010 года выпуска.

УДК 621.452.33

МЕХАНИЗМЫ ФОРМИРОВАНИЯ КОМБИНАЦИОННЫХ ЧАСТОТ В СПЕКТРЕ ВИБРОСИГНАЛА ЗУБЧАТОЙ ПЕРЕДАЧИ

Омель Д.В., Драган А.В.

Брестский государственный технический университет
Брест, Республика Беларусь

Дефекты зубчатых колес и зацеплений приводят к появлению дополнительных вынуждающих сил различной природы. Это могут быть и силы, вызванные отклонением формы зубьев от расчетной в зоне механического контакта, и ударные воздействия, определяемые изменением скоростей в зоне зацепления, параметрические силы из-за периодического изменения жесткости зацепления и силы трения между контактирующими поверхностями. Эксплуатационные

дефекты и погрешности контактирующих поверхностей зубьев являются дополнительными возмущающими факторами, которые приводят к изменению свойств виброакустического сигнала [9, 2, 3].

Вибрацию зубчатой пары можно описать наличием характерных дискретных составляющих спектра и их соотношений, изменяющихся с развитием деградиционных процессов в передаче. Появление и развитие дефектов контактирующих поверхностей отражается как на частотах пересопряжения зубьев $f_z = z f_o$ (зубцовых частотах) и их гармониках $m f_z$, так и на модуляционных (комбинированных) частотах $m f_z \pm k f_o$ в окрестности зубцовых гармоник, где m и $k = 1, 2, \dots$, f_o – частота вращения колеса (оборотная частота).

В работах [8, 7] при исследовании виброактивности дефектных зубчатых пар большое внимание уделяется модуляции выходного вибросигнала. Отмечается, что именно в боковых полосах зубцовых и кратных им гармоник содержится основная диагностическая информация.

Кроме дискретных компонентов в спектре колебаний непременно присутствует шумовая составляющая, обусловленная причинами, вызывающими колебания на собственных частотах механической системы. Фрагмент спектра в окрестности зубцовой частоты при отсутствии и наличии дефекта показан на рисунке 1.

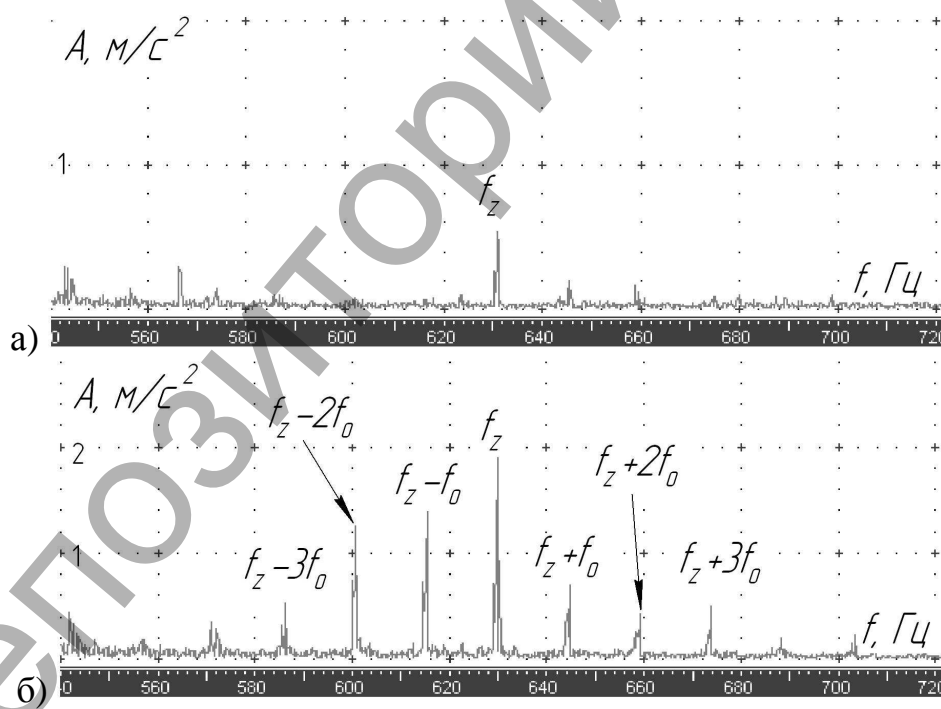


Рисунок 1 – Спектр сигнала в окрестности зубцовой частоты f_z : а – при отсутствии дефекта зубчатого колеса, б – при наличии дефекта

На начальном этапе развития дефектов зубозацепления зубцовые и комбинированные гармоники, являющиеся синхронными компонентами, содержат в себе практически всю мощность вибросигнала. По мере своего развития дефект становится более нестационарным, распределенным по частоте, возникают многие процессы, приводящие к размытию мощности вибросигнала на спектре

в промежутках между зубцовой и боковыми гармониками. Поэтому рост амплитуд гармонического ряда зубцовых частот, как и рост общего уровня вибраций при развитии дефектов, наблюдается лишь до определенного времени, после чего уровни вибраций на зубцовых и комбинированных частотах начинают падать, а глубина модуляции процесса в зоне гармоник зубцовой частоты продолжает нарастать [8, 1].

В работах по исследованию модуляций вибросигналов, генерируемых зубчатыми передачами, однозначно эмпирически доказано появление семейств гармоник $mf_z \pm kf_o$, однако не до конца раскрыт механизм их формирования. Возникают вопросы: почему появляются гармоники с частотами mf_z , кратными зубцовой и боковыми полосами kf_o в окрестности каждой из них; чем обусловлено количество боковых полос, что влияет на несимметричность верхних и нижних боковых полос. Для ответа на эти вопросы в проведенных исследованиях рассмотрено явление модуляции и механизмы формирования модулированного сигнала применительно к зубчатым передачам.

Сложный колебательный процесс можно описать выражением:

$$a(t) = A(t) \cos(\omega(t)t + \varphi(t)) = A(t) \cos \psi(t) \quad (1)$$

где A – амплитуда;

ω – частота;

φ – начальная фаза;

$\psi(t)$ – полная фаза высокочастотного колебания.

Как видно, все параметры колебания могут изменяться во времени. В зависимости от того, какой из этих трех параметров периодически изменяется, различают амплитудную (АМ), частотную (ЧМ) и фазовую модуляцию (ФМ), а также их сочетания. Выражение под знаком косинуса можно рассматривать как угловую функцию времени [4] и ввести понятие угловой модуляции (УМ), подразделяемой на частотную и фазовую.

Для анализа механизма формирования спектра вибросигнала, например изображенного на рисунке 1б, рассмотрены математические модели возникновения модулированного сигнала.

Амплитудная модуляция. Амплитудно-модулированный сигнал $a(t)$ (рисунок 2) предполагает изменение только амплитуды. Получено, что он описывается выражением следующего вида:

$$a(t) = A_0 \cos(\omega_0 t + \varphi_0) + \frac{MA_0}{2} \cos[(\omega_0 + \Omega)t + \varphi_0 + \gamma] + \frac{MA_0}{2} \cos[(\omega_0 - \Omega)t + \varphi_0 - \gamma] \quad (2)$$

где Ω и γ – частота и начальная фаза модулирующего сигнала;

$M = \Delta A_m / A_0$ – коэффициент модуляции;

ΔA_m – амплитуда изменения огибающей.

Первое слагаемое в правой части представляет собой исходный немодулированный сигнал. Второе и третье слагаемые появились в процессе модуляции, имеют частоты $\omega_0 + \Omega$ и $\omega_0 - \Omega$, называемые боковыми и расположены симметрично относительно несущей. Согласно выражения (2) амплитуда боковых час-

тот зависит от коэффициента модуляции, а следовательно, и от соотношения амплитуд несущего и модулирующего сигнала.

Данный вид модуляции объясняет появление в спектре вибросигналов боковых частот, однако возникновение кратных зубцовых гармоник mf_z не является следствием амплитудной модуляции сигнала.

Угловая модуляция. Данный вид модуляции характерен для случая, когда мгновенная частота модулированного сигнала определяется выражением:

$$\omega(t) = \omega_0 + \Delta\omega \cos \Omega t, \quad (3)$$

где $\Delta\omega$ – девиация частоты.

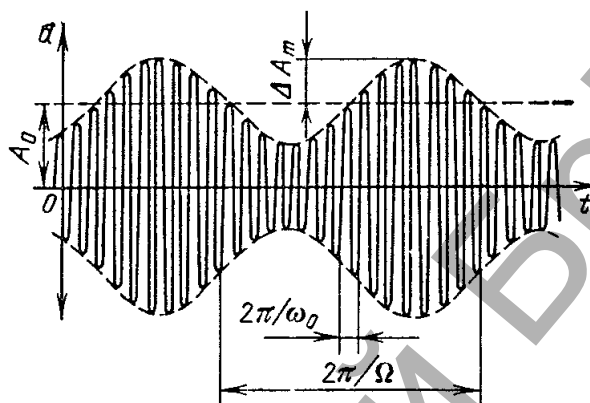


Рисунок 2 – Колебание, модулированное по амплитуде гармонической функцией [4]

Полная фаза высокочастотного колебания с учетом выражения (5) в таком случае будет иметь интегральный вид:

$$\psi(t) = \int_0^t \omega(t) dt + \varphi_0 = \omega_0 t + \frac{\Delta\omega}{\Omega} \sin \Omega t + \varphi_0 \quad (4)$$

Преобразование данных зависимостей с учетом (3), (4) и (1) позволило получить выражение модулированного сигнала в следующем виде:

$$a(t) = A_0 \cos \left[\omega_0 t + \frac{\Delta\omega}{\Omega} \sin \Omega t + \varphi_0 \right], \quad (5)$$

где величина $m = \frac{\Delta\omega}{\Omega}$ – индекс угловой модуляции.

Таким образом, при угловой модуляции (частотной или фазовой) спектр сигнала состоит из бесконечного числа боковых частот, расположенных попарно симметрично относительно несущей частоты ω_0 и отличающихся на $n\Omega$. Временное представление частотно-модулированного сигнала приведено на рисунке 4, а его спектр представлен на рисунке 5.

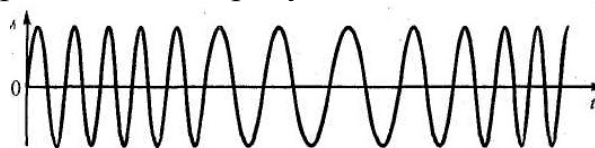


Рисунок 4 – Частотно-модулированный сигнал

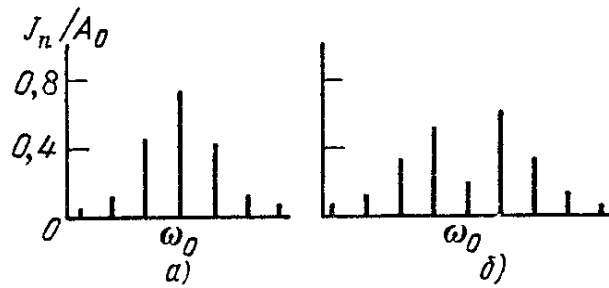


Рисунок 5 – Спектры сигналов с частотной модуляцией: а) $m=1$, б) $m=2$

Амплитуды боковых полос зависят от величины индекса угловой модуляции m . При малых значениях $m \ll 1$ спектр модулированного сигнала имеет одну пару боковых частот, как при АМ. При $0,5 < m < 1$ начинает проявляться вторая пара боковых частот. При $1 < m < 2$ уже следует учитывать третью и четвертую пары боковых частот и т.д.

Механизм формирования спектра сигнала с угловой модуляцией объясняет появление некоторого количества боковых полос вокруг несущей частоты. Количество боковых полос прямо пропорционально девиации несущей частоты $\Delta\omega$. Угловая модуляция по-прежнему не объясняет появление в вибросигнале гармоник mf_z .

Частотно-импульсная модуляция. Механизм формирования спектра колебаний при частотно-импульсной модуляции исследовался исходя из того, что несущим сигналом является периодическая последовательность импульсов с частотой ω_0 , которую можно записать выражением [6, 5]

$$A(t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} v\left(t - \frac{n}{\omega_0}\right) \quad (6)$$

где $v(t)$ – форма импульса.

В ходе математических преобразований получено следующее выражение импульсно-модулированного сигнала:

$$a(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \left\{ \begin{array}{l} J_{0n}(nm) \cos n\omega_0 t + \\ + J_{1n}(nm) [\cos(n\omega_0 + \Omega)t - \cos(n\omega_0 - \Omega)t] + \\ + J_{2n}(nm) [\cos(n\omega_0 + 2\Omega)t + \cos(n\omega_0 - 2\Omega)t] + \\ + J_{3n}(nm) [\cos(n\omega_0 + 3\Omega)t - \cos(n\omega_0 - 3\Omega)t] + \\ + \dots \end{array} \right\} \quad (7)$$

Из данного выражения видны составляющие спектра импульсно-модулированного сигнала $n\omega_0 \pm k\Omega$ ($k=1, 2, 3\dots$), которые представлены на рисунке 6. Количество боковых полос около каждой гармоники кратной несущей частоте зависит от индекса угловой модуляции m . Несимметричность боковых полос объясняется помехами и искажениями при прохождении сигнала по каналам передачи. В спектре зашумленного сигнала боковые полосы высокого порядка имеют малую амплитуду и оказываются «погруженными» в шум.

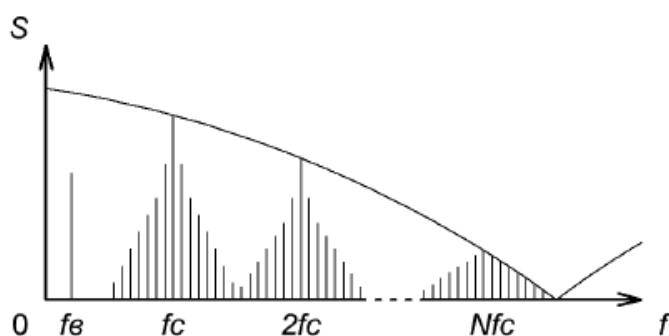


Рисунок 6 – Спектр сигнала с частотно-импульсной модуляцией

Вибрационный сигнал, генерируемый при работе исправной зубчатой передачи, представляет собой последовательность ударных импульсов, следующих с частотой пересопряжения зубьев и возбуждающих быстро затухающие гармонические колебания. Причем каждая пара зубьев возбуждает импульсы, отличные от предыдущего вследствие наличия технологических погрешностей изготовления колес, погрешностей сборки зубчатой передачи, упругих деформаций валов, а также зубьев находящихся в зацеплении. Такие погрешности приводят к колебанию амплитуды импульсов, а также отклонению периода их следования вследствие кинематических погрешностей. Данные явления повторяются при каждом обороте валов, то есть связаны с частотой их вращения. Поэтому признаки модуляции в спектре можно наблюдать и при отсутствии эксплуатационных повреждений зубьев. Амплитуды комбинационных гармоник $mf_z \pm kf_o$ будут незначительны в силу малой энергии удара, боковые частоты будут слабо различимы на фоне шумовой составляющей вибрации. Лишь зубцовые и кратные им гармоники mf_z легко идентифицируются в спектре вибрации исправной передачи. По мере появления и развития износа рабочей поверхности зуба и усиления ударного взаимодействия возрастает энергия, рассеиваемая в зоне контакта, следовательно, растут амплитуды характерных гармоник и модуляционные эффекты.

Рассмотрев приведенные выше виды модуляции, можно сделать вывод, что модуляции, исследуемые в вибродиагностике, можно относить как к частотно-импульсным, так и к амплитудным и частотным. В спектре виброакустического сигнала зубчатой передачи с частотно-импульсной модуляцией можно наблюдать семейство гармоник $mf_z \pm kf_o$. Различные виды модуляций, обусловленные дефектами и погрешностями зубчатых колес, могут возникать одновременно и приводить к увеличению амплитуд боковых полос, их несимметричности и определяются состоянием зубчатых передач. Количественные показатели их оценки являются информативными критериями, отражающими состояние зубчатых передач, и способны дополнить существующие положения вибродиагностики механических приводов.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Барков А.В. Мониторинг и диагностика роторных машин по вибрации: учеб. пособие / А.В. Барков, Н.А. Баркова, А.Ю. Азовцев. – СПб.: Изд. центр СПбГМТУ, 2000. – 159 с.
2. Генкин М.Д. Виброакустическая диагностика машин и механизмов / Генкин М.Д., Соколова А.Г. – М.: Машиностроение, 1987. – 288 с.

3. Герике Б.Л. Мониторинг и диагностика технического состояния машинных агрегатов: учеб. пособие: в 2-х ч. Ч.2: Диагностика технического состояния на основе анализа вибрационных процессов. – Кемерово: Кузбасский государственный технический университет, 1999. – 230 с.
4. Гоноровский И.С. Радиотехнические цепи и сигналы: учебник для вузов. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Радио и связь, 1986. – 512 с.
5. Давыдов И.Г. Алгоритм оценки частоты повторения ударных импульсов на основе периодического вейвлет-преобразования / И.Г. Давыдов, С.Ю. Васюкевич, А.В. Цурко, И.М. Сеглюк. – Доклады БГУИР, №6(84), 2014. – с. 22-27.
6. Зюко А.Г. Теория электрической связи : учебник для вузов / А.Г. Зюко, Д.Д. Кловский, В.И. Коржик, М.В. Назаров; под ред. Д.Д. Кловского. – М. : Радио и связь, 1999. – 432 с.
7. Неразрушающий контроль: Справочник : в 7 т.; под общ. ред. В.В. Клюева. Т.7: ч 2 кн. Кн. 1: В.И. Иванов, И.Э. Власов. Метод акустической эмиссии / Кн. 2 : Ф.Я. Балицкий, А.В. Барков, Н.А. Баркова и др. Вибродиагностика. – М. :Машиностроение, 2005. – 829 с.
8. Русов В.А. Спектральная вибродиагностика. – М.: Вибро-Центр, 1996. – 175 с.
9. Ширман А.Р. Практическая вибродиагностика и мониторинг состояния механического оборудования / А.Р. Ширман, А.Б. Соловьев. – М.: Наука, 1996. – 276 с.

УДК 621.762.53

ПОЛУЧЕНИЕ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА АЛЮМИНИЙ-УГЛЕРОДНОЕ НАНОВОЛОКНО С ПОВЫШЕННЫМИ ПРОЧНОСТНЫМИ СВОЙСТВАМИ И РЕГУЛИРУЕМОЙ ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬЮ

Возняковский А.А.¹, Кольцова Т.С.², Кидалов С.В.¹, Овчинников Е.В.³

1) ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, РФ

2) СПбГПУ, Санкт-Петербург, РФ

3) Гродненский государственный университет им. Янки Купалы, Гродно, РБ

Алюминий широко применяется в современном материаловедении в качестве конструкционного материала. Главными достоинствами алюминия являются его низкий удельный вес, дешевизна. Главным же недостатком алюминия является его низкая прочность. Также алюминий обладает высокой ($237 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$) теплопроводностью, которая может быть, как достоинством (теплоотвод), так и недостатком (теплоизолятор) в зависимости от сферы применения. Для повышения прочностных свойств и снижения теплопроводности алюминия предлагается технология композиционных материалов с применением углеродных нановолокон (УНВ) в качестве добавки.

В качестве исходного материала был взят порошок алюминия марки ПА-4. Создание композиционного материала происходило путем выращивания УНВ на поверхности частиц порошка алюминия через никелевый катализатор. Подобный подход позволил добиться равномерного распределения УНВ по всему объему матрицы, что крайне важно для достижения высоких практических свойств. Были получена серия образцов с 1, 1,5 и 2 масс. % УНВ. Результаты СЭМ исследования материала с 1 масс. % УНВ представлены на рисунке 1. Подробно методика описана в работе [1].

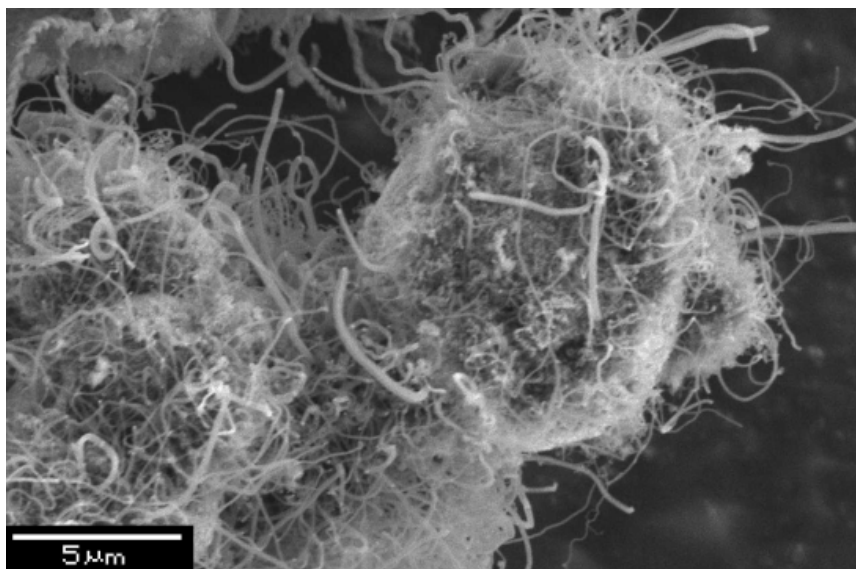


Рисунок 1. Композиционный материал алюминий-углеродные нановолокна

В качестве методики компактирования материала была выбрана методика горячего прессования. С помощью данной методики была произведена серия опытов в диапазоне давлений от 2 до 5 ГПа, температуры от 400 до 1500 °С и времени выдержки от 15 до 60 секунд.

Результаты исследований показали, что при добавлении уже 1 масс. % УНВ наблюдается рост твердости по сравнению с чистым алюминием с 30 до 60 НВ, а также падение теплопроводности с 237 до 60 Вт/(м*К). Резкий рост твердости полученного композита объясняется природой УНВ и их высокими прочностными свойствами. Резкое снижение теплопроводности объясняется тем, что каждая частица алюминия эффективно отделяется от остальных частиц слоем из хаотически направленных УНВ с низкой теплопроводностью.

Работа поддержана грантом РФФИ №16-32-80092.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Т.С. Кольцова, Ф.М. Шахов, А.А. Возняковский, А.И. Рудской, А.Г. Насибулин, О.В. Толочко. Получение компактного материала алюминий – углеродные нановолокна с высокими механическими свойствами методом горячего прессования. ЖТФ. 84(11) (2014) 47-51.

УДК 620.004.5

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ПРИ АКУСТИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКЕ МНОГОВАЛЬНЫХ ЗУБЧАТЫХ ПРИВОДОВ

Драган А.В., Парфиевич А.Н., Саливончик Ю.Н.

Брестский государственный технический университет

Брест, Республика Беларусь.

Искусственная нейронная сеть (ИНС) является математической, либо программной, либо аппаратной моделью, моделирующая принципы организации и функционирования биологических нейронных сетей, и состоит из соединенных и взаимодействующих между собой вычислительных элементов – нейронов.

Теория ИНС имеет цель моделирования биологической нейронной сети для достижения таких свойств систем как способность к обучению, самоорганизации и адаптации. На сегодняшний день существует большое количество архитектур ИНС, которые благодаря своим особенностям, например, в процессе обучения выявлять сложные зависимости в наборе данных, с успехом применяют при решении таких сложных инженерных задач как распознавание образов, классификация, прогнозирование и т.д. В ходе проводимых исследований производилась попытка применения ИНС в целях диагностики зубчатых приводов.

Одним из объектов исследования был выбран горизонтальный редуктор с цилиндрическими прямозубыми колесами. В качестве источника информации о его состоянии использовался акустический шум, сформированный аппаратно-программным комплексом [1] на основе данных, полученных с измерительного микрофона с капсулем M101. Также одновременное применение преобразователей угловых перемещений на входном и выходном валах объекта дало возможность с высокой точностью определять частоты вращения входного и выходного вала и частоты характерных составляющих на спектре анализируемого сигнала. На одном из колес редуктора моделировались эксплуатационные дефекты в виде скола зуба. Замеры проводились для каждого состояния (25%, 50%, 75% длины зуба и без зуба) в количестве 25 раз для накопления необходимого объема данных. Результаты, полученные при использовании серийных колес, приняты за эталонные.

Анализируя полученные спектры акустического сигнала, можно выявить в области низких частот оборотные f_0 и кратные им составляющие всех валов кинематической цепи редуктора, в области пересопряжения зубьев – зубцовые f_z и кратные им составляющие зубчатых колес, а также составляющие колебаний с комбинированными частотами $lf_z \pm nf_0$ ($l, n=0,5;1;1,5;2$ и т.д.) (рисунок 1, а). Процедура выявления этих компонентов из чрезмерно насыщенного сигнала очень трудоемка, что привело к разработке и реализации в программной части комплекса новой функции, позволяющей автоматически получать значения всех составляющих, формирующих диагностические признаки (рисунок 1, б).

Полученный объем экспериментальных данных был разбит на 5 классов в зависимости от состояния зуба и применен при решении задачи классификации. В качестве классификатора была выбрана многослойная нейронная сеть с одним скрытым слоем, состоящим из нейронов Кохонена [2]. Ее структура представлена в виде трех слоев:

- первый слой нейронных элементов предназначен для распределения входных сигналов на нейроны Кохонена скрытого слоя. Размерность входного слоя определяется размерностью анализируемых данных. В нашем случае используются данные размерностью равной 60, следовательно, количество нейронов распределительного слоя равно 60. Входными сигналами являются параметры, сформированные на основе функции аппаратно-программного комплекса «Анализ гармоник» (рис. 1, б).

- второй, скрытый, слой искусственной нейронной сети состоит из нейронов Кохонена. Слой Кохонена играет ключевую роль в классификации данных и осуществляет кластеризацию входного пространства образов, в результате чего образуются кластеры различных образов, каждому из которых соответствует свой нейронный элемент.

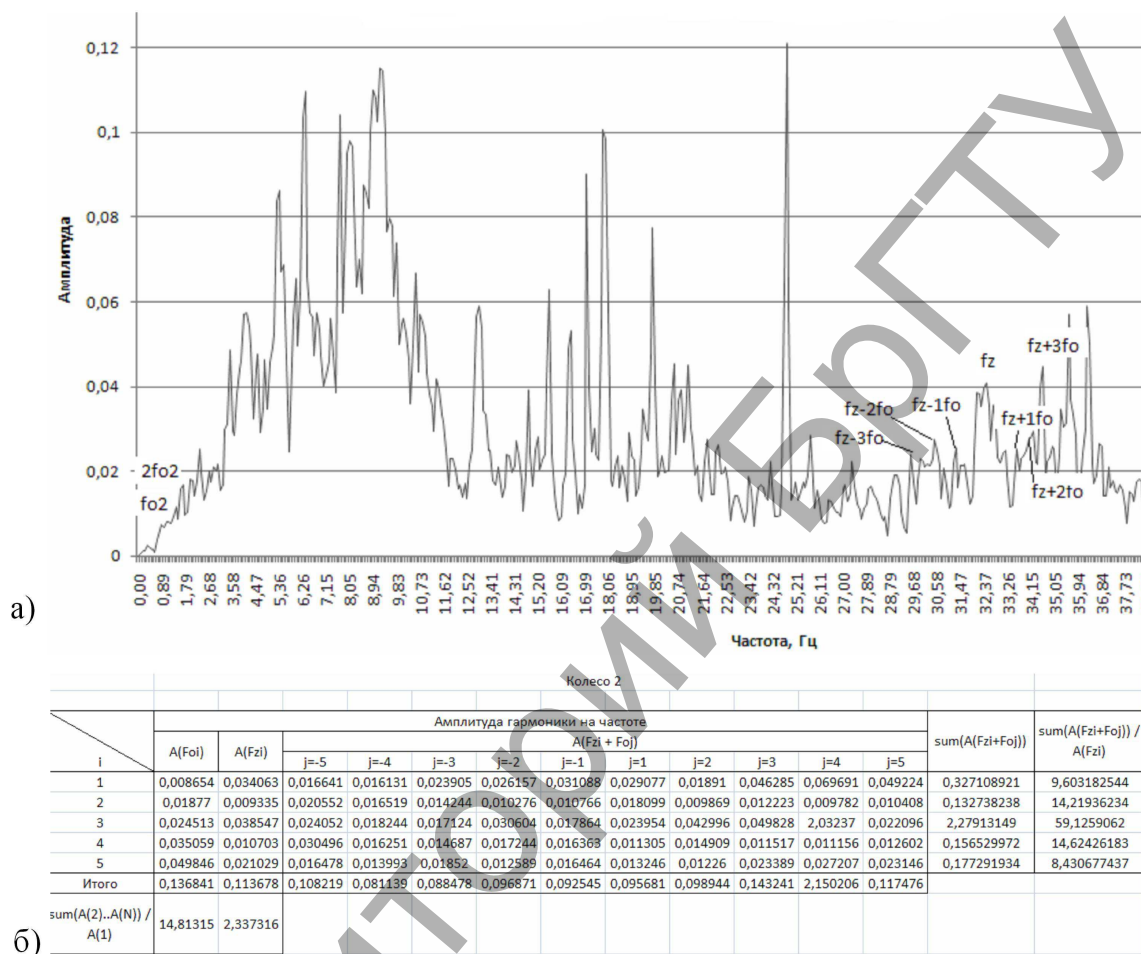


Рисунок 1 - Результат обработки спектра акустического сигнала с помощью функции аппаратно-программного комплекса «Анализ гармоник»: а) фрагмент спектра акустического сигнала в области оборотных частот f_0 и в области частот $(f_z-5f_0)-(f_z+5f_0)$ шестерни z_2 ; б) экспериментальные данные, полученные с помощью функции комплекса «Анализ гармоник».

Оптимальное количество нейронов в скрытом слое Кохонена определяется экспериментально, и могут отличаться от разновидности задач, структуры данных и т.д. В нашем случае эксперименты показали хорошие результаты при количестве нейронов в скрытом слое равным 30. Для обучения слоя Кохонена используется конкурентный метод обучения [2], [3]. Суть данного метода обучения заключается в том, что в процессе обучения происходит конкуренция между нейронными элементами, в результате чего определяется нейронный элемент-победитель, который характеризует класс анализируемых данных. Для определения нейрона-победителя используется Евклидово расстояние между входным и весовым векторами, определяемое следующим образом:

$$D_i = |X - \omega_i| = \sqrt{(X_1 - \omega_{i1})^2 + (X_2 - \omega_{i2})^2 + \dots + (X_c - \omega_{ic})^2}, \quad (1)$$

где ω_{ci} – весовой коэффициент между c -м нейроном распределительного слоя и i -м нейроном слоя Кохонена; $X = [X_1, X_2, \dots, X_n]$ – входной образ.

В процессе обучения синаптические связи для нейрона-победителя усиливаются, а для остальных нейронов не изменяются. Таким образом, после обучения ИНС, при подаче входного образа активность нейрона-победителя принимается равной единице, а остальные нейроны «сбрасываются» в ноль [2-4].

- третий слой состоит из одного линейного нейронного элемента, который осуществляет отображение 5 кластеров, сформированных слоем Кохонена. Активность выходного нейрона, когда значение его равно единице, характеризует тот или иной класс. В этом случае все остальные выходные нейроны имеют активность равную нулю.

Из представленных ниже результатов видно, что общая точность классификации разработанного нейросетевого классификатора составляет 92,2%. Причем точность классификации 1-го класса составила 88,9%, 2-го, 3-го и 5-го классов – 100%, а точность классификации 5-го класса – 72,7% (рис. 2, а).

Относительно невысокая точность классификации пятого класса связана со средней квадратичной ошибкой обучения нейронной сети, которая составила 0,00533. Как видно из рис. 2,б, в процессе обучения нейронная сеть не смогла корректно научиться классифицировать образы из 5-го класса, где она показала точность классификации равной 93,3%, что и отразилось на группировании тестового набора данных. Данный недостаток может быть устранен изменением количества нейронов в скрытом слое или увеличением размерности обучающей выборки.

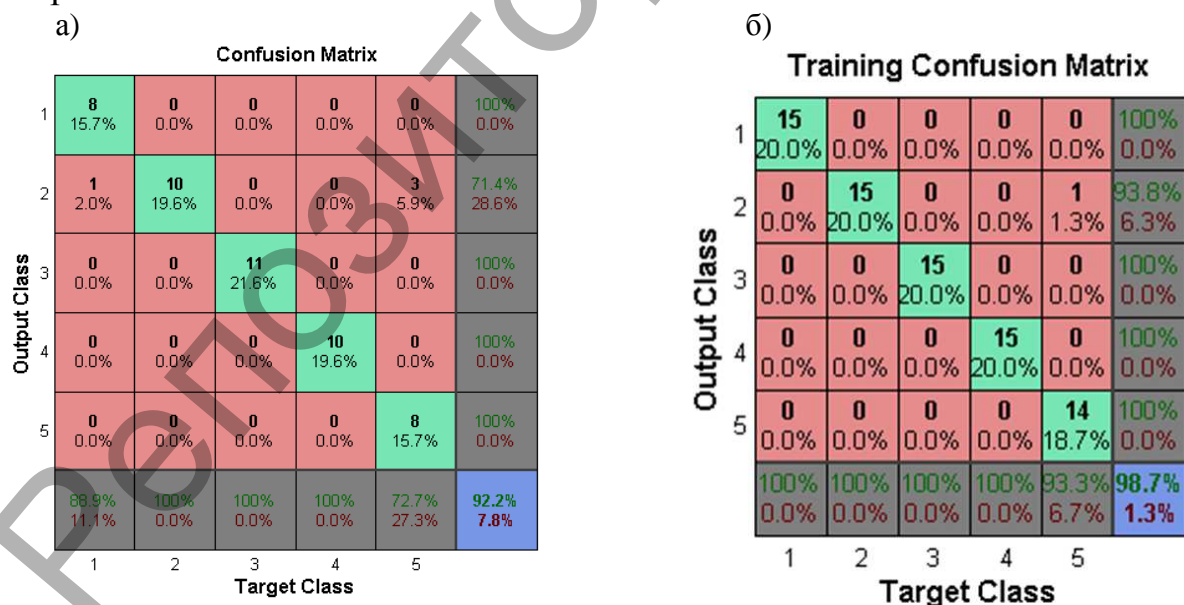


Рисунок 2 - Результаты работы искусственной нейронной сети: а) результаты решения задачи классификации; б) результаты обучения нейросетевого классификатора

Таким образом, разработанная методика диагностирования элементов исследуемого объекта с использованием искусственных нейронных сетей показала свою высокую эффективность. Определение диагностируемого параметра с помощью нейросетевых моделей диагностируемого объекта показало высокую точность. Данный подход в диагностике многозубчатых приводов позволит отказаться от трудоемкого экспертного анализа акустических данных и повысить объективность принятия решения. Несмотря на то, что этот метод требует большого объема предварительных исследований, обучения сети, определения технологии подготовки данных, обучив нейронную сеть, ее можно в дальнейшем использовать для постановки диагноза на основе новых сведений.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Драган А.В., Стецко И.П., Ромашко Д.А., Левкович Н.В. Новые аппаратно-программные средства для исследования и диагностики механических систем // Вестник Брестского государственного технического университета. — 2006. — №4. — С. 17—26.
2. Kohonen, T. Self-organized formation of topologically correct feature maps / T. Kohonen // Biological Cybernetics. — 1982. — N43. — P. 59-69.
3. Головкин, В.А. Нейронные сети: обучение, организация, применение / В.А. Головкин // Нейрокомпьютеры и их применение : учеб. пособие / В.А. Головкин. — М., 2001 — 256 с.
4. Хайкин, С. Нейронные сети: полный курс / С. Хайкин. — М.: Вильямс, 2006. — 1104 с.

УДК 621.762

ТЕРМОСТОЙКИЕ ПОКРЫТИЯ, ФОРМИРУЕМЫЕ НА ОСНОВЕ РЕФРАКТОРНЫХ МЕТАЛЛОВ

Чекан Н.М.¹, Овчинников Е.В.², Акула И.П.¹, Эйсымонт Е.И.², Шагойка Г.А.²

1) ФТИ, г.Минск, РБ

2) Гродненский государственный университет им. Янки Купалы, Гродно, РБ

Поверхностная, структурная и химическая модификация материалов, нанесение тонких плазмохимических покрытий на рабочие поверхности изделий являются одним из наиболее эффективных технологических методов повышения их эксплуатационных свойств [1-3]. При этом достигаемый эффект зависит от большого числа факторов, среди которых наиболее важным является выбор оптимальных по химическому составу и свойствам материала покрытия и технологии его формирования.

Основными особенностями как тонких металлических, так и полимерных покрытий являются их достаточно высокая структурная неоднородность, зависимость свойств от толщины слоя и природы материала подложки, на поверхность которой они осаждаются. Под действием поля твердой поверхности в слоях тонкослойного покрытия, находящихся в контакте с подложкой (граничных слоях), протекают специфические процессы структурной перестройки [4]. Если толщина покрытия соизмерима с толщиной граничного слоя, то возникает ряд эффектов, обусловленных термодинамической неустойчивостью пленочных систем [5]. Разработка технологических основ процесса упрочнения изделий машиностроения из конструкционных сталей путем нанесения антифрикционных, коррозионностойких покрытий с малым уровнем механических на-

пряжений и характеризующихся низкой плотностью макродефектов является актуальной проблемой, решение которой позволит повысить рабочий ресурс изделий. Одним из направлений получения таких защитных слоев является получение комбинированных покрытий, включающих в свой состав несколько химических элементов. Так, широко применяются в машиностроении, авиастроении покрытия на базе нитрида титана, карбида титана, карбонитрида титана; недостатками данных покрытий является недостаточная термостойкость, находящаяся в области 800 – 1200 К.

Целью данной работы является исследование структуры и физико-механических характеристик вакуумных покрытий получаемых на основе рефракторных металлов.

Методом оптической микроскопии проведен анализ образцов тонкослойных покрытий AlTiN, сформированных на стальной подложке (рисунок 1). Технологические параметры получения покрытий AlTiN: образец №2- давление азота $1,1 \cdot 10^{-2}$ Па, напряжение смещения -50 В; образец №6- давление азота $2,4 \cdot 10^{-2}$ Па, напряжение смещения -100 В; образец №7- давление азота $3,2 \cdot 10^{-2}$ Па, напряжение смещения -50 В.

Используя программный пакет AutoScan, определено процентное содержание включений в структуре покрытий. Установлено уменьшение количества включений с увеличением значений вакуума в рабочей камере (рисунок 2).

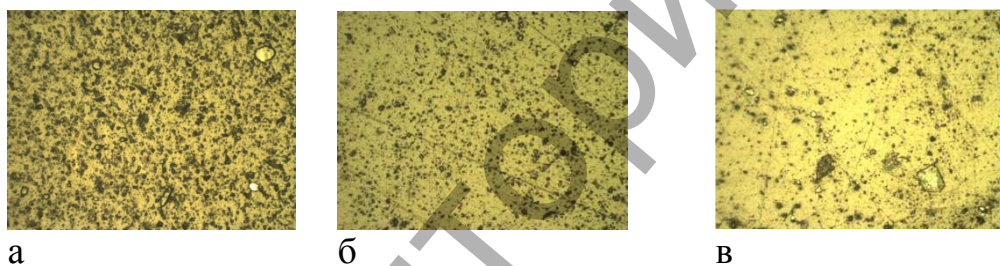


Рисунок 1 - Морфология поверхностных слоев покрытий AlTiN: а-образец №2, б- образец №6, в-п образец №7. (x600).

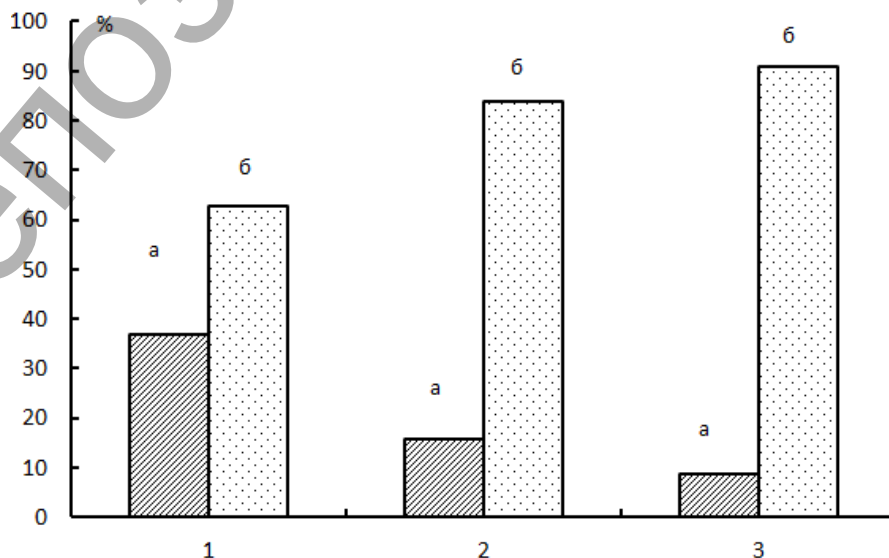


Рисунок 2 - Количественное распределение включения в структуре покрытий AlTiN. 1-образец 2; 2- образец 6, 3- образец 7; а-включения, б-матрица.

Для определения энергетических параметров адсорбированных слоев AlTiN использовали метод прямотеневого определения краевого угла смачивания. Использовали жидкости различающиеся полярностью для изучения смачивания и расчета сил адгезии, полярного и дисперсионных составляющих поверхностной энергии. Результаты исследований приведены на рисунке 3.

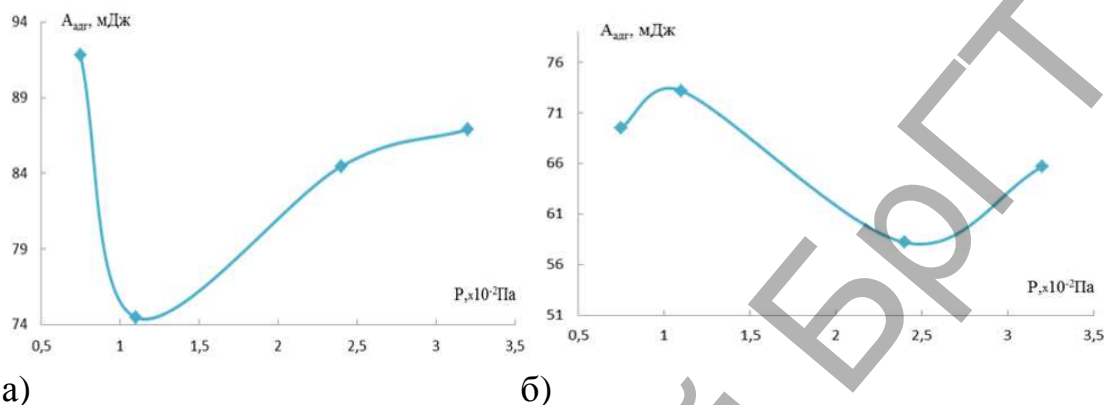


Рисунок 3 – Работа силы адгезии дистиллированной воды к AlTiN в зависимости от давления в вакуумной камере при формировании покрытия. а- формирование покрытия проводилось при напряжении смещения на катоде минус 50 В, б - формирование покрытия проводилось при напряжении смещения на катоде минус 100 В.

Проведенные исследования показали, что значения поверхностной энергии, так и ее составляющих зависят от условий нанесения покрытия, а также от разности потенциалов, подаваемых на катод. С увеличением напряжения на катоде минимум значений поверхностной энергии смещается в область более высоких давлений. Дальнейшее увеличение давления реакционного газа в камере приводит к увеличению значений поверхностной энергии получаемых покрытий.

Установлено, что алюминий активно вступает в реакцию с азотом, и оксиды алюминия практически не образуются; в то время как титан образует как нитриды, так и оксиды. В целом, в осажденных покрытиях, полученных из сплавных катодов Ti-Al с использованием дугового испарения, преимущественно формируются из нитридов титана и алюминия. Покрытия AlTiN, сформированные при высоком вакууме в камере характеризуются большим количеством включений, которые имеют фактически одинаковые физико-механические характеристики с матрицей покрытия. Увеличение давления газов в вакуумной камере приводит к увеличению геометрических размеров включений, при увеличении их концентрации их в матрице покрытия.

Данный характер распределения включений наблюдается при напряжении смещения на катоде минус 50 В. Увеличение смещения напряжения на катоде приводит к изменению характера распределения включений в матрице покрытий с увеличением давления реакционного газа в камере, происходит

диспергирование структурных составляющих в покрытии AlTiN. Проведен анализ известных методов нанесения тонкослойных покрытий в вакууме и аналитического описания межфазных процессов, протекающих при взаимодействии конденсированных сред. Рассмотрена морфология, структура поверхностных слоев покрытий нитридов алюминия и титана, находящихся на металлической поверхности. Установлен характер взаимного влияния слоев на распределение активных центров и энергию межфазного взаимодействия.

Сформулирована модель, позволяющая провести аналитическое описание диффузионных процессов в условиях протекания контактных химических реакций. Численными методами получены распределения металла и соединений по толщине граничного слоя. Определены кинетические особенности диффузионных процессов и их зависимость от толщины слоя, температуры. Подача на подложку потенциала смещения $-(75 - 150)$ В приводит к формированию в пленках Ti-N сильной текстуры и крайне высоких сжимающих напряжений, а значит увеличению периода решетки в направлении нормали к поверхности, что сказывается на прочностных характеристиках исследуемых покрытий.

Покрытия TiAlN могут успешно применяться в металлообработке при высоких скоростях обработки металлов. Перспективным направлением является применение многослойных покрытий для формирования гетероструктур.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Полевой, С.Н. Упрочнение машиностроительных материалов. / С.Н. Полевой, В.Д. Евдокимов - М.: Машиностроение, 1994.- 496 с.
- 2 Чеботаровский, В.В. Технология лакокрасочных покрытий в машиностроении. / В.В. Чеботаровский, Э.К. Кондратов - М.: Машиностроение, 1978.-295 с.
- 3 Ткачук, Б.В. Получение тонких полимерных покрытий из газовой фазы. / Б.В. Ткачук, В. М. Колотыркин - М.: Химия, 1977.-216 с.
- 4 Липатов, Ю.С. Межфазные явления в полимерах. / Ю.С. Липатов - Киев: Наукова думка, 1980.-260 с.
- 5 Дерягин, Б.В. Теория устойчивости коллоидов и тонких пленок. / Б.В. Дерягин - М.: Наука, 1986.-206 с.

УДК 621

ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ ПРИ СВАРКЕ ТРЕНИЕМ И ИСПЫТАНИЯ НА РАЗРЫВ ИССЛЕДУЕМЫХ ОБРАЗЦОВ

Добрисяник Ю.А.¹

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

Сварка трением – это разновидность сварки давлением, при которой нагрев осуществляется трением, вызванным перемещением (вращением) одной из соединяемых частей свариваемого изделия [1].

Сварка трением широко внедрена в ведущих отраслях машиностроительного производства при изготовлении:

в автомобилестроении – деталей рулевого управления, карданных валов легковых и грузовых автомобилей, полуосей, картеров задних мостов автомоби-

лей, клапанов двигателей внутреннего сгорания, цилиндров гидросистем и др.; в тракторостроении – деталей рулевого управления, планетарных передач, валов отбора мощности, катков, траков, роторов турбонагнетателей дизельного двигателя и др.;

в электропромышленности – деталей высоковольтной аппаратуры, выводов бумагомаляных конденсаторов, кислотных аккумуляторов и анодов игнитронов, поршней пневмоцилиндров сварочных машин и др.;

в инструментальном производстве – при массовом изготовлении концевых режущего инструмента (фрезы, сверла, метчики) [2].

Была поставлена следующая задача: определить, как будет влиять скорость вращения при сварке трением на прочностные характеристики шва.

Для сварки трением необходимо использовать специальные машины, однако принципиально сварку трением можно вести на любом металлорежущем станке, имеющем патрон на вращающемся шпинделе для закрепления одной из свариваемых деталей и место для установки второй детали (токарный, фрезерный, расточной, сверлильный и т. п. станки).

Для проведения эксперимента мы использовали токарный станок модели 1К62. На рисунке 1 показаны основные операции получения шва при сварке трением:

1. Одну свариваемую заготовку ($d = 14$ мм, материал Ст.3) закрепляем в трехкулачковый самоцентрирующийся патрон, вторую – в цанговый патрон, установленный в пиноль задней бабки.

2. Устанавливаем соответствующую частоту вращения (для эксперимента выбрали: $n_1 = 2000$ мин⁻¹, $n_2 = 1600$ мин⁻¹, $n_3 = 1250$ мин⁻¹.), включаем станок и медленно подводим к вращающейся заготовке неподвижную (при этом надежно фиксируем и заднюю бабку и пиноль), последовательно увеличивая усилие сжатия между заготовками.

3. Формирование сварного шва (кромки заготовок расплавляются «до красна»), происходит схватывание свариваемых заготовок, отключение шпинделя, быстрый останов.

4. Непосредственно полученный шов сваркой трением.

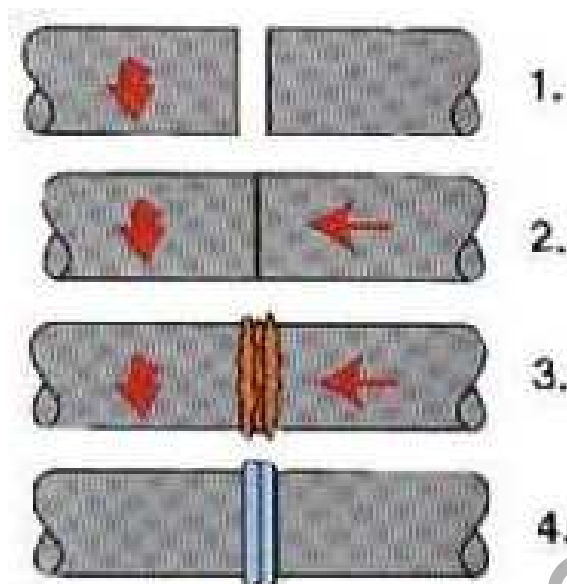


Рисунок 1 – Операции сварки трением при проведении опытов

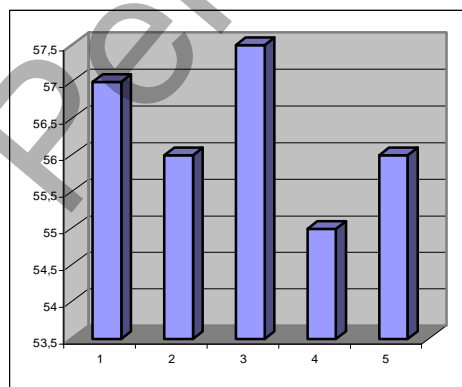
Таким образом было получено по 5 испытуемых образцов для каждой из трех частот вращения.

Следующий этап – это испытания на разрыв (растяжение) производили на разрывной машине с максимальным разрывным усилием 100 тонн. Полученные результаты заносим в таблицу 1.

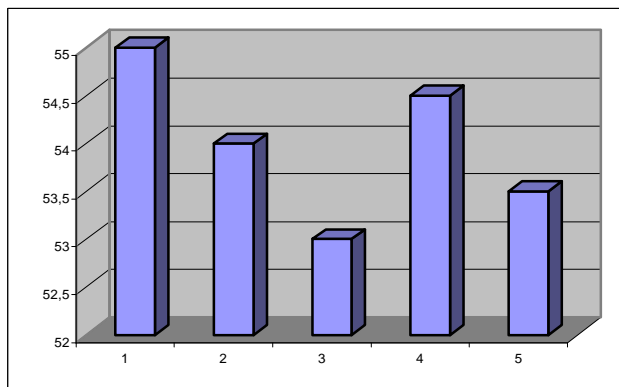
Таблица 1 – Разрывные усилия испытуемых образцов, кН

№ образца	Частота вращения, мин ⁻¹		
	2000	1600	1250
1	57	55	4,6
2	56	54	4,5
3	57,5	53	4,4
4	55	54,5	4
5	56	53,5	4,2

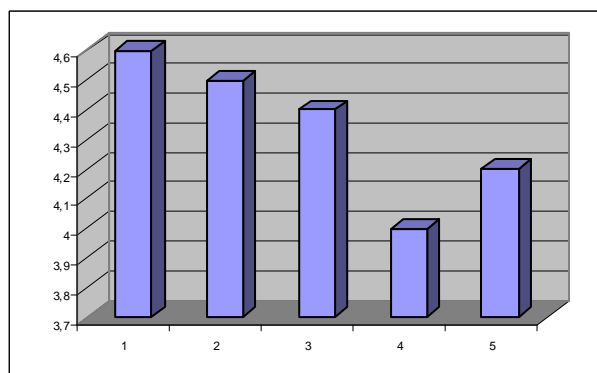
Для более наглядного восприятия согласно полученным разрывным усилиям построим три гистограммы (рисунок 2).



а)



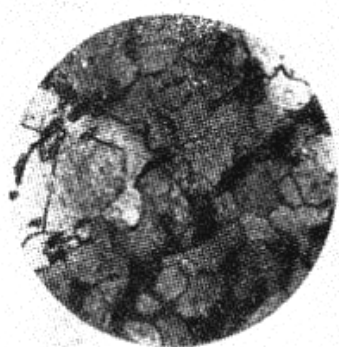
б)



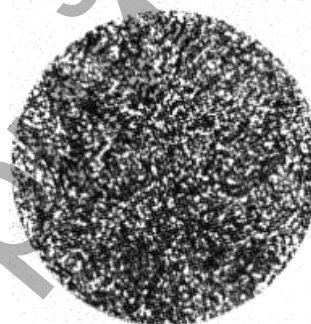
в)

Рисунок 2 – Гистограммы распределения разрывных усилий:
a – для частоты вращения 2000 мин^{-1} ; *б* – для частоты
 вращения 1600 мин^{-1} ; *в* – для частоты вращения 1250 мин^{-1}

При сварке трением получается достаточно высокое качество сварного шва, в чем особенно можно убедиться посмотрев микрошлифы свариваемого материала и шва (рисунок 3).



a)



б)

Рисунок 3 – Микроструктура: *a)* – основного металла (Ст.3); *б)* – металл стыка (сварка трением)

Стык свободен от пор, раковин, различного рода инородных включений и других макропороков, а металл стыка и зон термического влияния в результате ударного термомеханического воздействия (быстрые нагрев и охлаждение в присутствии больших – в несколько сотен атмосфер – давлений), по своему характеру близкого к режимам термомеханической обработки металлов, приобретает равноосную и сильно измельченную структуру.

Из всего вышесказанного можно сделать следующие выводы:

1. При правильно выбранном режиме сварки металл стыка и прилегающих к нему зон обладает прочностью и пластичностью, не меньшими, чем основной металл соединяемых деталей. Это в некоторой степени подтверждается экспериментом: так разрывное усилие образцов диаметром $d = 14 \text{ мм}$ составило 56 кН (отметим для сравнения, чтобы разрушить образец из Ст.3 $d = 16 \text{ мм}$ необходимо приложить усилие порядка 85 кН).

2. Как видно из опытов, частота вращения – один из основных показателей (наравне с прижимным усилием), влияющими на качество сварного шва. Так было установлено, что чем больше частота вращения, тем выше разрывное усилие сварного шва испытываемых образцов.

3. Сварка трением весьма экономичный процесс. Потребление электроэнергии в 7-40 раз меньше, чем при контактной электросварке; нагрузка трехфазной сети, питающей приводной электродвигатель, вполне равномерна [3]. Способ позволяет сваривать разнородные металлы (алюминий с медью, алюминий со сталью, медь со сталью и пр.). Ширина зоны влияния сварного соединения не более 2-3 мм. Особенно эффективна сварка заготовок металлорежущего инструмента сверл, метчиков и т. д. из углеродистой и быстрорежущей стали.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Сварка. Том 1. Развитие сварочной технологии и науки о сварке. Технологические процессы, сварочные материалы и оборудование. Комов В.В., 1990. - 536 с.
2. Ольшанский Н.А., Николаев Г.А. «Специальные методы сварки». М.: «Машиностроение», 1999. -232 с.
3. «Теоретические основы сварки». М.: Высшая школа, 2004. -592стр.

УДК 678.01

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАРЯДОВОГО СОСТОЯНИЯ НАНОДИСПЕРСНЫХ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЧАСТИЦ

*Рыскулов А.А.², Овчинников Е.В.¹, Эйсымонт Е.И.¹, Григорьева Т.Ф.³
Сластенов П.С.¹*

- 1) Ташкенский автомобильно-дорожный институт,
г. Ташкент, Узбекистан.
- 2) Гродненский государственный университет им. Янки Купалы,
г. Гродно, РБ
- 3) Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН,
г. Новосибирск, РФ

Проводимые системные исследования, в 60 - 80 годах прошлого столетия, композиционных материалов, содержащих, в том числе и ультрамалые по геометрическим размерам добавки и модификаторы, на основе различных матриц, когда устоявшихся терминов, относящихся в настоящее время к низкоразмерным объектам, не существовало, свидетельствуют о том, что роль данных объектов в процессах структурирования, формообразования, контактных процессов в динамических и статических системах различного химического строения, состава, структуры очень высока [1-4]. Одним из основных направлений в области создания новых композиционных материалов на базе полимеров, является применение наноразмерных частиц. Применение данного класса веществ обусловлено их высокой активностью, в результате строения отличного от строения блочных материалов, того же химического состава.

Наноконпозиционные материалы на базе термопластичных матриц находят широкое применение в узлах трения машин, механизмов и технологического

оборудования [1-3]. При определении условий эксплуатации композиционных материалов одним из основных факторов является, какие модификаторы введены в полимерную матрицу, как изменяют механизмы и кинетику физико-химических взаимодействий в структуре высокомолекулярных соединений [2, 3]. При этом важное значение имеет не только состав этих компонентов, но и их дисперсность и активность.

Целью данной работы является исследование зарядового состояния нанодисперсных диэлектрических частиц.

В качестве объектов исследований использовали нанофазные и нанодисперсные частицы силикатов, механоактивированные частицы. Зарядовую активность механоактивированных нанодисперсных силикатных частиц оценивали методом термостимулированной токовой спектроскопии на приборе ST-1 (ОДО «Микротестмашины», г. Гомель).

Согласно данным работы [5] показано, что для модификаторов природного происхождения характерным признаком является повышенная активность в области температур 15 °С – 50 °С, вероятно, обусловленная движением молекул адсорбированных продуктов из окружающей среды – влаги, газов и др., а также низкомолекулярных компонентов, входящих в структуру полуфабрикатов [5]. Проведенные исследования по изучению зарядовой активности кремня (рисунок 1), хотя и приводят к приблизительно одинаковым результатам, однако имеют существенные различия от результатов, полученных в работе [5]. Это выражается в различии наблюдаемых токовых пиков.

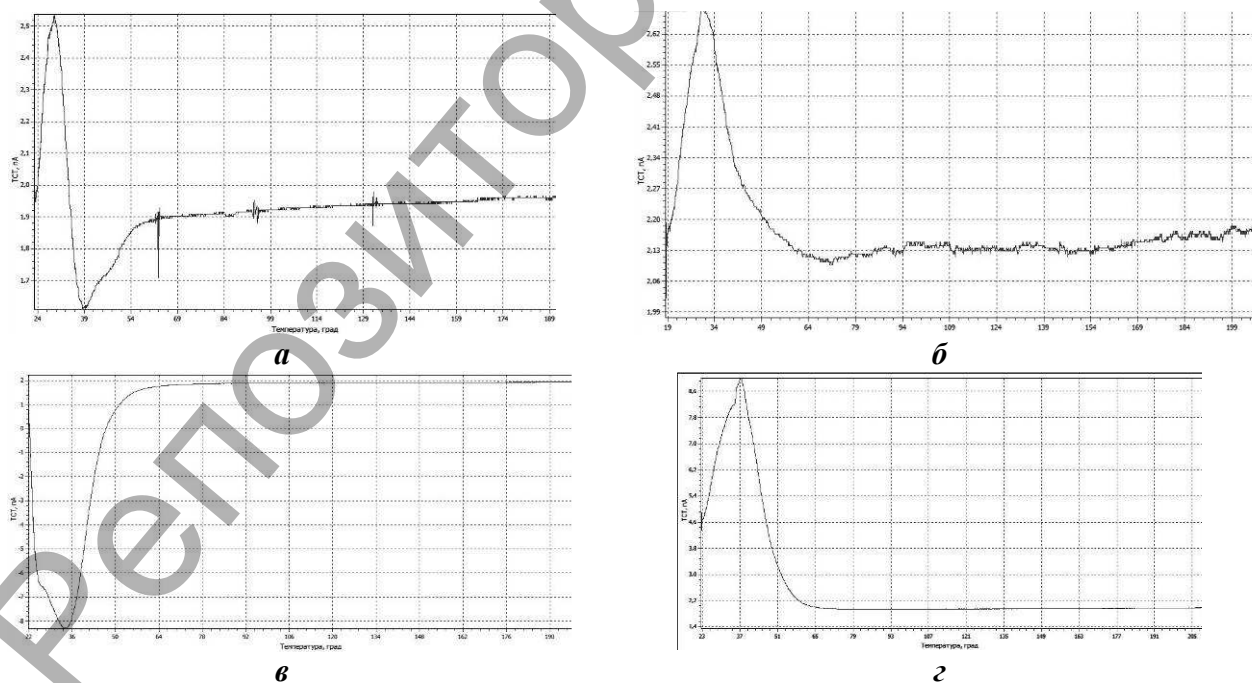


Рисунок 1 - ТСТ-спектры кремня: а – кремень, б – кремень термообработанный, в – кремень механоактивированный ($\tau_c=30$ с), г – SiO₂ инкапсулированный в кремень ($\tau_c=30$ с)

Так, для исходного кремня наблюдается дублет пиков: пик I ~ 30 °С, пик II – 39 °С (рисунок 1), согласно данных работы [5] наблюдается один пик в области ~ 32 °С. Проведение предварительной термической обработки приводит к вырождению дублета и образованию широкого пика в области 29 °С – 30 °С, однако величина термостимулированного тока примерно остается одинаковой: 2,5 пА для исходного кремня и 2,65 пА для термообработанного. Проведение механоактивации дисперсных частиц кремня приводит к появлению широкого и интенсивного токового пика.

Таким образом, наличие оксидов металлов в структуре кремня определяет активность данного минерала. Данное предположение подтверждается данными ТСТ-спектроскопии металлических частиц (рисунок 2) – продуктов металлургического производства состав, которых приведен в таблице 1. В спектрах термостимулированных токов оксидных частиц металлов, видны интенсивные полосы тока проводимости, которые возникают при нагревании образца.

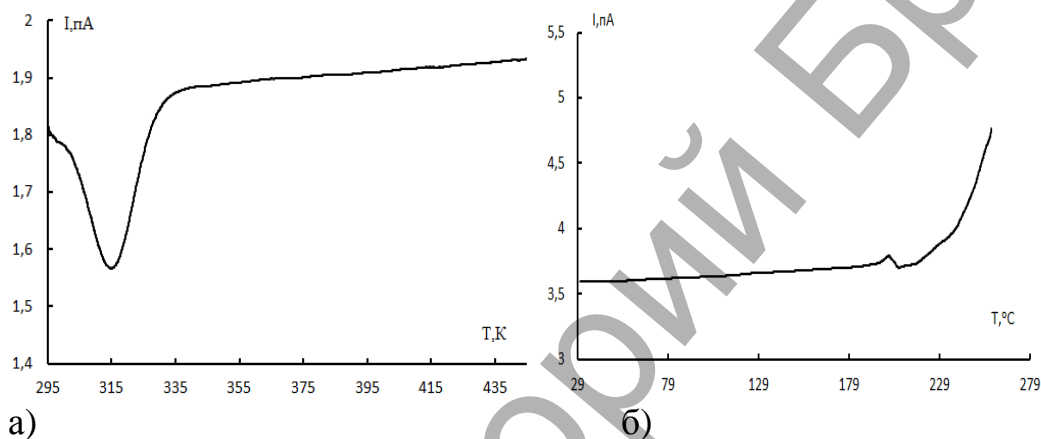


Рисунок 2 - ТСТ-спектры наномодификаторов: а- аэросила (SiO_2), б- низко-размерные продукты металлургического производства

Таблица 1 - Состав продуктов металлургического производства

Компонент	Содержание, % мас.
FeO	4,61
Fe ₂ O ₃	28 – 37
SiO ₂	4,49
Zn	25 – 36
P	0,105
Mn	1,84
MgO	1,13
CaO	8,84
Cr	0,25
Ni	0,05
Cu	0,138
S	0,82

На рисунке 3 представлена морфология частиц механоактивированного кремня и композиций на его основе. Частицы механоактивированного кремня

имеют больше висцерную форму, в то время как механоактивированные композиции на базе SiO_2 и кремня – глобулярную.

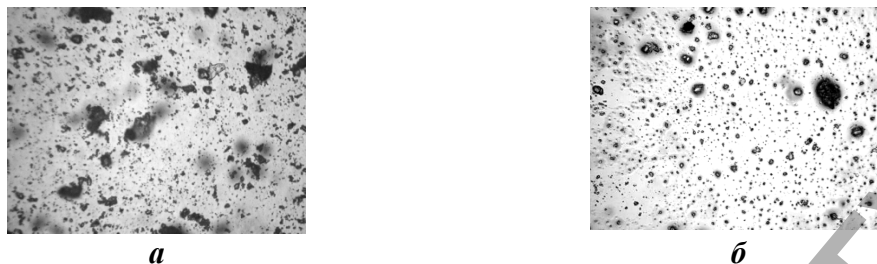


Рисунок 3 - Морфология частиц механоактивированного кремня: а – кремнь, б – SiO_2 инкапсулированный в кремнь

Таким образом, рассмотрены аспекты, связанные с образованием нанодисперсных инкапсулированных композитов на базе комплексных соединений оксидов металлов и силикатов (Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , SiO_2). Установлено образование активных центров основного и кислотного характера, выражающееся в увеличении значений термостимулированного тока механоактивированных композиций. Наблюдается различие формы и размеров, исходных механоактивированных частиц по сравнению с частицами композиций на их основе. Наличие нескомпенсированного заряда в получаемых механоактивированных частицах позволяет предположить их в качестве ингибиторов трения и изнашивания металлополимерных пар трения.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Белый, В.А. Металлополимерные системы / В.А. Белый, Ю.М. Плескачевский. - М.: Знание, 1982. – 64 с.
- 2 Струк, В.А. Трибохимическая концепция создания антифрикционных материалов на основе многотоннажно выпускаемых полимерных связующих: дисс. ... докт. техн. наук: 05.02.01. / В.А. Струк. – Минск, 1988.–323 с.
- 3 Гольдаде, В.А. Ингибиторы изнашивания металлополимерных систем / В.А. Гольдаде, В.А. Струк, С.С. Песецкий. – М.: Химия, 1993. – 240 с.
- 4 Рыскулов, А.А. Разработка машиностроительных материалов на основе смесей металлополимеров: дисс. ... канд. техн. наук: 05.02.01. / А.А. Рыскулов. – Гомель, 1990. –201 с.
5. Эйсымонт, Е.И. Оценка бактерицидной активности дисперсных частиц природных модификаторов / Е.И. Эйсымонт. // Веснік ГрДУ, сер. 6. – 2011. – № 1 (116). – С. 56 61.

УДК 621.762

МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ РАЗРАБОТКИ, СОЗДАНИЯ И ПРИМЕНЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКИХ КОРУНДОВЫХ МАТЕРИАЛОВ - ИЗДЕЛИЙ ДЛЯ МЕХАНИЗМОВ ПОДЗЕМНОЙ ПРОХОДКИ ГРУНТОВ И ПРОИЗВОДСТВА МЕТАЛЛОКОРДА

*Шмурадко В. Т., Пантелеенко Ф. И., Реут О. П., Руденская Н. А.,
Пантелеенко А. Ф.*

Белорусский национальный технический университет,
г. Минск, Республика Беларусь.

Применение в исследовании дифференцированного подхода в выборе и использовании нужных информационных технологий и компьютерного моделирования позволило повысить эффективность материаловедческих и технологических разработок, ускорило реализацию технологического получения абразивно-износостойких дюз и триботехнических роликов на основе дисперсно-упрочненного $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, легированного MgO (материал M1) и ZrO_2 ЧСЦ Y_2O_3 (материал M2).

Созданы базовые составы износостойких материалов $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3 - \text{MgO}$ (M1); $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3 - \text{ZrO}_2$ ЧСЦ Y_2O_3 (M2), заменившие твердосплавные. На их основе получены активированные керамические вяжущие суспензии (АВКВС), литейные шликеры, отливки, механолегированные ультрадисперсные и гранулированные пресс-порошки (рис. 1). Исследованы процессы и механизмы прессования гранул при 50 – 300 МПа и процессы тепловой обработки и спекания заготовок в температурном диапазоне 24 – 1200 – 1600 – 1800 °С. Установлены и обоснованы закономерности фазовых переходов моноклинного (*m*)- ZrO_2 в тетрагонально-кубические фазы (*t-c*)- ZrO_2 (и наоборот) в корундовой матрице ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$) при нагреве и скоростном охлаждении оксидной композиции $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3 - \text{ZrO}_2 - \text{Y}_2\text{O}_3$.

Проведен анализ механизмов дисперсного упрочнения корундовой матрицы ультрадисперсными частицами (30 – 100 нм) из диоксида циркония, частично стабилизированного оксидом иттрия (ZrO_2 ЧСЦ Y_2O_3), по температурной схеме 24 °С – нагрев → 1800 °С охлаждение → 24 °С. Установлено, что механизмы дисперсного упрочнения наиболее эффективно выполняются при соответствующем введении в корундовую матрицу частиц ZrO_2 размером 75 – 100 нм.

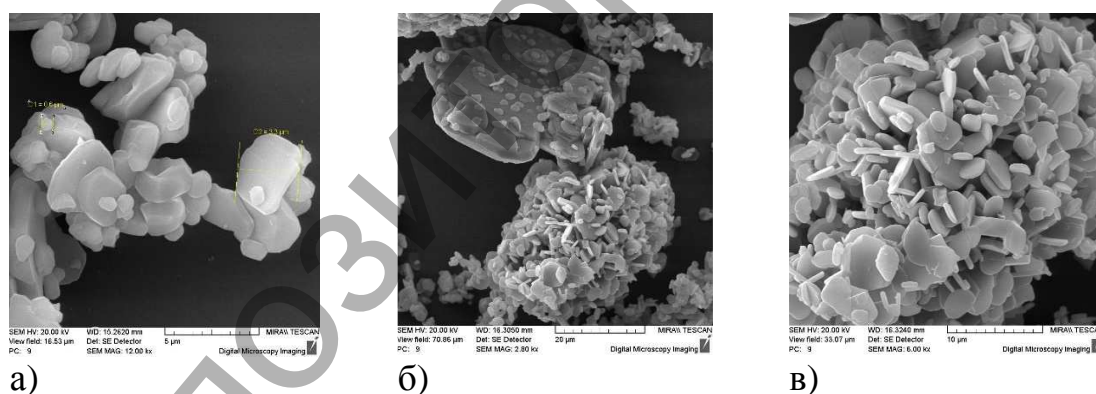


Рисунок 1 - Топография порошка $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3 \times 5000$ после жидкостного размола (а) и гранул $\times 5000$ (б), $\times 10000$ (в), полученных из шликерных отливок

Изготовлены экспериментальные образцы: абразивно-износостойких дюз (рис. 2а) для механизмов подземной бестраншейной проходки грунтов (путем создания канала), его бетонирования и последующей прокладки кабельных коммуникаций в промышленно-городских условиях (ООО «КлассикСтройКомплект», г. Минск), а так же триботехнических поддерживающих роликов

(рис. 2б) для производства металлокорда (РУП «БМЗ – БМК», г. Жлобин). Проведены натурные испытания экспериментальных образцов, заменивших твердосплавные. Получены положительные результаты.



а)



б)

Рисунок 2 - Дюзы для механизмов подземной проходки грунтов (а) и поддерживающие ролики для производства металлокорда (б).

Таким образом, сформирована научно-практическая операционно-логистическая блок-схема комплексного системно-дифференцированного исследования и разработки, анализа и проектирования физико-химических процессов и механизмов структурной инженерии в материаловедении и технологиях создания конструкционных износостойких материалов – изделий и гибких мобильных производств.

В рамках разработанной операционно-логистической блок-схемы, с позиций материаловедческой программной формулы «химический и фазовый составы–иерархия структурных уровней–свойства – дисперсно-упрочненный износостойкий материал», перетекающей в технологическую стадию (формулу) «создание АВКВС–литейного шликера – шликерных отливок, из них – гранулированных структур–объемных упаковок, из гранул–прессовок – проведение тепловой обработки–спекания материала–изделия» исследованы и технологически реализованы физико-химические процессы и механизмы структурной инженерии на технологических этапах превращения корундовых порошков в конструкционные износостойкие материалы.

Исследованы реологические (структурно-механические) и технологические свойства АВКВС, условия их превращения в заданные технологические литейные шликеры, шликерные отливки, гранулы, объемные гранульные упаковки, прессовки и спеченные материалы (изделия).

Проведен системно-дифференцированный анализ превращения техногенного корундового сырья в конструкционный износостойкий материал; при этом, получены следующие технологические показатели процесса переработки корунда в базовые материалы М1 и М2:

- жидкостной механохимический (трибохимический) размол оксидов, создание АВКВС и литейного шликера выполнялось при рН 1,2 – 1,7 (кислая сре-

да) и 9,0 – 10,5 (щелочная); достигнутая при этом дисперсность твердой фазы 1...10 – 100...300 нм представляет собой физико – химические образования золь-коллоидных частиц на основе ионов металла оксидов и комплексных ионов кислотных и гидроксильных групп, включая наноразмерные частицы от размола окислов; причем кислый литьевой шликер формировался при размоле и диспергировании порошковых композиций в 1 – 4 N (нормальном) растворе HCl; суспензионный эффект (СЭ), возникающий при намоле и суспендировании нано- и микроразмерных частиц с образованием, при этом, других химических объединений в виде золь и с увеличением их концентрации, ΔрН составил 1 – 5,7 при изменении рН в пределах 1,5 – 6,0; с ростом количества золь СЭ и количество связанной воды увеличивалось;

- дисперсность твердой фазы и ее фракционные отношения (массовое содержание, %) в литьевом шликере составили: 0,01...0,50 мкм – 3...5 %; 0,5...1,0 мкм – 75...80 %; >1 мкм – 17...20 %;

- оптимальная вязкость литьевых шликеров для М1 и М2 находилась в пределах 0,05 – 0,2 Па·с при относительной плотности систем 0,6 – 0,78;

- кажущаяся плотность шликерных отливок для М1 составила: 2,32 – 2,80 г/см³, относительная плотность 58 – 70 %, $\sigma_{сж} = 3...10$ МПа; $\sigma_{изг} = 1...3$ МПа; для отливок М2: 2,54...3,01 г/см³, относительная плотность 60...71 %, $\sigma_{сж} = 4,3...11,7$ МПа; $\sigma_{изг} = 1,6...3,6$ МПа;

- характеристики гранульных упаковок до и после виброуплотнения, включая прессование: относительная плотность гранул 58 – 71 %; засыпок из них (до виброуплотнения) 53 – 66 % , после виброуплотнения 55 – 69 %; после прессования 83 – 85 %.

Согласно выполненным исследованием и полученным результатам изготовлены и испытаны экспериментальные образцы износостойких корундовых дюз, которые успешно (в рамках контрактов) заменили твердосплавные в устройствах подземной проходки (проколки) грунтов и бетонирования каналов для последующей прокладки различных масштабных водо- и газопроводов, кабельных электро-, теле-, радиокommunikаций и т.д. Кроме того, из разработанных материалов изготовлены поддерживающие ролики триботехнического назначения для производства металлокорда; испытаны на РУП «БМЗ – БМК» г. Жлобин, получены положительные результаты – срок службы изделий при непрерывном производстве металлокорда составил 22- 30 суток.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Шевченко В.Я. Техническая керамика. [Текст] / В.Я. Шевченко, С.М. Баринов, - М.: Наука, 1993. 187с.

2. Баринов С.М. Прочность технической керамики. [Текст] / С.М. Баринов, В.Я. Шевченко, - М.: Наука, 1996. – 159с.

3. Пивинский Ю.Е. Керамические вяжущие и керамобетоны. [Текст] / Ю.Е. Пивинский, М.: Металлургия, 1990. 272с.

4. Роман О.В. Научно – практические подходы к созданию керамо – огнеупорных материалов и технологий / О.В. Роман, Ф.И. Пантелеенко, О.П. Реут, В.Т. Шмурадко, Н.В. Киршина, А.В. Жилевич // Новые огнеупоры. – 2010. - № 9. – С. 17 – 27.

ТЕРМОЦИКЛИРОВАНИЕ КАК СПОСОБ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ДИФФУЗИОННОГО НАСЫЩЕНИЯ ПРОВОЛОКИ В УСЛОВИЯХ ЭЛЕКТРОКОНТАКТНОГО НАГРЕВА

Семенченко М.В.

Полоцкий государственный университет
г. Новополоцк, Республика Беларусь

Диффузионное насыщение проволоки вызывает определенный интерес из-за возможности получения ограниченных партий материала для наплавки, напыления, сварки. Предлагаемые производителями составы, как правило, унифицированы и могут одновременно использоваться для решения достаточно большого спектра задач.

Оптимизировать состав наносимого материала в промышленных масштабах для конкретных условий эксплуатации детали не всегда представляется возможным. Более того, в сложившейся экономической ситуации не многие предприятия имеют возможность закупать проволоку различного химического состава даже небольшими партиями. Именно поэтому диффузионно-легированную проволоку можно назвать альтернативой проволочному материалу, получаемому в промышленном масштабе. Она может использоваться как присадочный материал при нанесении защитных покрытий [1] и как самостоятельный конструкционный материал [2].

Наибольшее распространение получило диффузионное в изотермических условиях при печном нагреве. Однако в последнее время все больший интерес стали вызывать способы, во время которых температура процесса изменяется по определенному закону. Последовательный нагрев и охлаждение обрабатываемого материала позволяет добиться уникальных свойств, которые часто не достижимы иным способом обработки [3]. Во время термоциклирования накапливаются необходимые структурные изменения, позволяющие значительно улучшить качество обрабатываемых изделий или придать им свойства, которые невозможно было обеспечить путем однократного нагрева. В итоге обработка в режиме термоциклирования способствует увеличению толщины формируемого диффузионного слоя и улучшению механических характеристик сердцевины.

Насыщение проволоки в условиях печного нагрева не всегда экономически выгодно. Значительная протяженность при малом поперечном сечении накладывает определенные ограничения на технологию обработки. Для исключения значительной пространственной деформации, в частности, требуется изготовление специальных приспособлений или контейнеров, которые позволят предотвратить слипание отдельных витков проволоки. Хотя даже в этом случае длина обрабатываемого отрезка проволоки является ограниченной конструктивными особенностями и геометрическими параметрами используемого приспособления.

Обеспечить непрерывность обработки длинномерных изделий позволяет использование альтернативных способов нагрева обрабатываемого изделия, к ко-

торым стоит отнести электроконтактный нагрев. Нами разработан способ диффузионного насыщения стальной проволоки [4] и установка для его реализации [5], позволившая полностью снять ограничения по длине обрабатываемой поверхности. Проволока подается в зону обработки непрерывно с заданной постоянной скоростью (рис.1). При этом требуемая температура обработки достигается за достаточно малый промежуток времени.

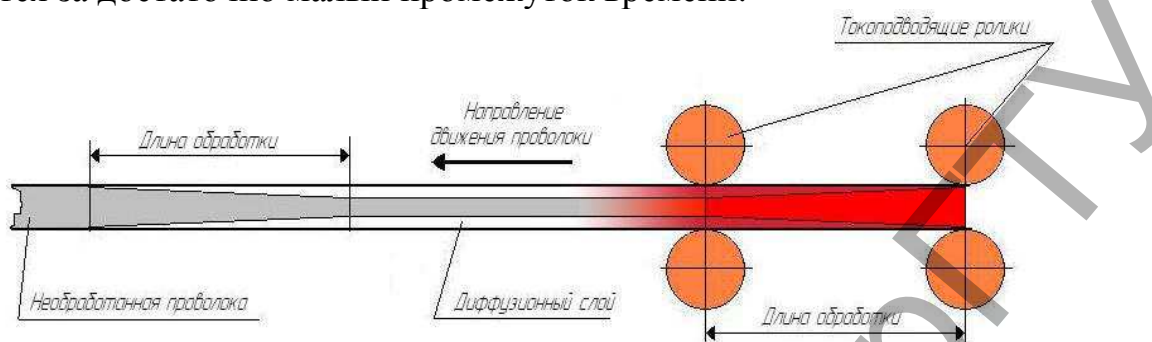


Рисунок 1 – Схема процесса диффузионного легирования стальной проволоки с применением циклического электроконтактного нагрева при непрерывной подаче проволоки в зону обработки.

Нагрев проволоки осуществлялся путем пропускания переменного электрического тока, проходящего через проволоку с длительностью импульса 0,01 – 10 секунды (время нагрева) и длительностью паузы 1 – 3 секунды (время охлаждения) (рис.2). Так, применение циклического электроконтактного нагрева при насыщении стальной проволоки алюминием позволило сформировать диффузионный слой толщиной до 0,2 мм за 5 минут, в то время как при печном нагреве для этого требовалось больше времени.

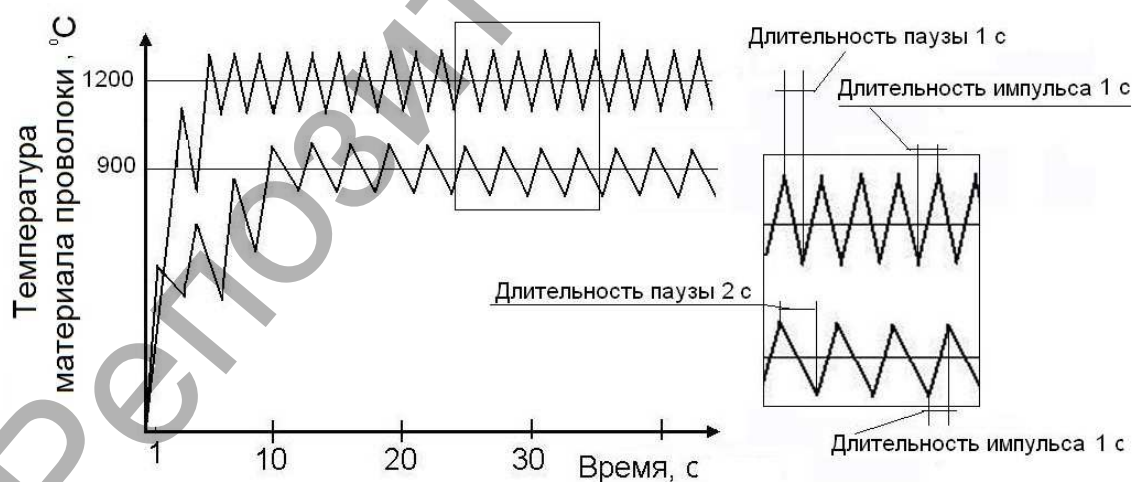


Рисунок 2 – Изменение температуры проволоки в процессе обработки

В качестве насыщающей смеси применялись порошки чистых металлов, либо порошки веществ, из которых выделение активных атомов легирующего элемента не требует длительного времени и высокой температуры.

Исследования показали, что в случае обработки непрерывно движущейся стальной проволоки наиболее оптимальным является назначение длительности импульса в пределах от 0,1 до 10 секунд, длительности паузы в пределах от 1 до 3 секунд.

Формируемый диффузионный слой представляет собой, как правило, твердый раствор алюминия в α -железе с микротвердостью 2300-2100 Мпа. Это обусловлено тем, что температура проволоки выше температуры насыщающей среды, следовательно, выше ее диффузионная восприимчивость. Поэтому скорость диффузии легирующего элемента в ненасыщенную основу значительно превосходит скорость его осаждения на поверхность проволоки.

Также исследовалась возможность диффузионного насыщения проволоки путем применения обмазок. При этом подготовительная работа при диффузионном легировании отрезка длиной 240 мм из обмазок составила 30 минут: 10 минут на подготовку составов двух слоев обмазки (слоя для насыщения и специального защитного слоя) и по 10 минут на сушку каждого слоя. Время непосредственного насыщения составило 3 минуты. Соответственно, общее время обработки отрезка проволоки длиной 240 мм равно 33 минут. Для диффузионного легирования следующего отрезка проволоки операции необходимо было повторить.

По производительности диффузионное насыщение в обмазках сопоставимо с печным нагревом, но если требуется небольшое количество присадочного материала, такой вариант также заслуживает внимания. Сделать процесс непрерывным можно путем проектирования специального устройства, обеспечивающего последовательное нанесение обмазки для насыщения, защитной обмазки и их сушку при непрерывной подаче проволоки. Кроме того, обмазка не должна препятствовать подводу электрического тока к проволоке

Таким образом, термоциклирование представляется перспективным направлением для интенсификации процессов диффузионного насыщения проволоки в условиях электроконтактного нагрева. Режим обработки подбирается индивидуально, в зависимости от состава основы, ее размеров и вида насыщающего элемента. Данным способом можно получить проволоочный материал требуемого химического состава любой протяженности за ограниченное время.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ 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. High-carbon steel wire with nickel sub coating: United States Patent 7300706, B 32B 15/02, B 32B 15/18 – John J. Zimmerman; заявитель: NV BeKaert SA/ Заявл. Jul. 28, 2006, Опубл. Nov. 27, 2007;
3. Федюкин, В.К. Термоциклическая обработка металла и деталей машин / В.К.Федюкин, М.Е.Смагоринский. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1989. – 255 с.
4. Способ диффузионного насыщения стальной проволоки: Патент на изобретение № 13370 МПК (2009) С 23С 8/00, С 23С 10/00, С 23Д 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

5. 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., Оpubл. 30.12.02

УДК 621.785.532.062.57

УПРОЧНЕНИЕ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА АЗОТИРОВАНИЕМ В ТЛЕЮЩЕМ РАЗРЯДЕ

Копейко Д. С., Гаврилова Ж. И.

Барановичский государственный университет,
г. Барановичи, Республика Беларусь

Эффективным способом повышения эксплуатационных характеристик режущего инструмента является азотирование – процесс диффузионного насыщения поверхностного слоя сталей и сплавов азотом при нагревании в азотосодержащей среде [2]. Перспективным методом азотирования является азотирование в тлеющем разряде или ионно-плазменное азотирование (ИПА) [1].

Данный процесс является высокопроизводительным, материалосберегающим, экологически чистым, что отвечает современным требованиям.

Принцип действия ИПА заключается в том, что в разряженной азотсодержащей газовой среде (200-1000 Па) между катодом и анодом возбуждается аномальный тлеющий разряд, образующий активную среду (ионы, атомы, возбужденные молекулы). На катоде располагаются обрабатываемые детали. В качестве анода служат стенки вакуумной камеры [3]. Процесс обеспечивает формирование на поверхности изделия азотированного слоя, состоящего из двух зон: внешней, нитридной и располагающейся под ней диффузионной зоны.

Для управления структурой слоя и механическими свойствами слоя применяют (в разные стадии процесса):

- изменение плотности тока;
- изменение расхода азота;
- изменение степени разрядения;
- добавки к азоту особо чистых технологических газов: водорода, аргона, метана, кислорода.

Проблема упрочнения режущего инструмента широко известна на любом машиностроительном предприятии. Применение ионно-плазменного азотирования имеет свои особенности по сравнению с традиционными способами термообработки. Главная особенность ИПА заключается в том, что все процессы происходят вблизи поверхности, что вносит свою специфику в свойства поверхностного слоя инструмента, а также вносит изменения в его химический состав.

С помощью ИПА можно добиться создания поверхностного слоя с высокой твердостью, износостойкостью, повышенной усталостной прочностью и высоким сопротивлением коррозии.

Азотированные детали имеют в 1,4–4 раза большую износостойкость по сравнению с закаленными, цементованными и нитроцементованными сталями.

Целью данной работы является изучение влияния ИПА на металлообрабатывающее сверло. Для этих целей были выбраны два сверла, изготовленные из материала HSS (аналог P6M5) с цилиндрическим хвостовиком, производства компании BOSH (рисунок 1).



Рисунок 1 – Сверло HSS с цилиндрическим хвостовиком Ø14 мм

Параметры этого сверла представлены в таблице 1:

Таблица 1– Параметры экспериментального сверла

Материал изготовления	Диаметр	Угол заточки при вершине	Рабочая длина	Общая длина
Быстрорежущая сталь P6M5	Ø14 мм	118 градусов	108 мм	160 мм

Задача заключалась в том, чтобы проазотировать одно из сверл методом ИПА, и затем сравнить с аналогичным непроазотированным образцом. При этом особое внимание следовало уделить тому, как изменились эксплуатационные характеристики и какой практический эффект это принесло.

На рисунке 2 показана режущая кромка сверла до азотирования. Как можно видеть из рисунка наблюдаются некоторые микросколы, но данные неровности не окажут существенного влияния при обработке на качество поверхности.



Рисунок 2 — Режущая кромка сверла до азотирования

После азотирования сверла на его поверхности сформировался упрочненный слой глубиной 20-40 мкм. Были сделаны замеры его твердости и составили 63...65 HRC.

В результате проведенных испытаний азотированного образца было установлено, что азотированная поверхность инструмента стала обладать улучшенными антифрикционными свойствами, отвод стружки стал более легким. Коэффициент трения стал значительно ниже. Значительно сократилось образование лунок износа. Всё вышеперечисленное позволяет увеличить подачу и скорость резания.

Следует отметить, что ленточная часть сверла полностью проазотирована. Так как данная часть сверла работает в условиях повышенной нагрузки, то к ней предъявляются особые требования. По этому, здесь следует отметить и некоторый отрицательный эффект применения метода ИПА для азотирования сверла. Он заключается в том, что повышение прочности и твердости влечет за собой повышение хрупкости, что влечет за собой при обработке металла сколы на ленточке и главной режущей кромке сверла (рисунок 3). Это объясняется мартенситовыми свойствами азотированной быстрорежущей стали. Но этот эффект можно считать единственным и незначительным недостатком, т.к. повышение хрупкости не выходит за пределы допустимых.

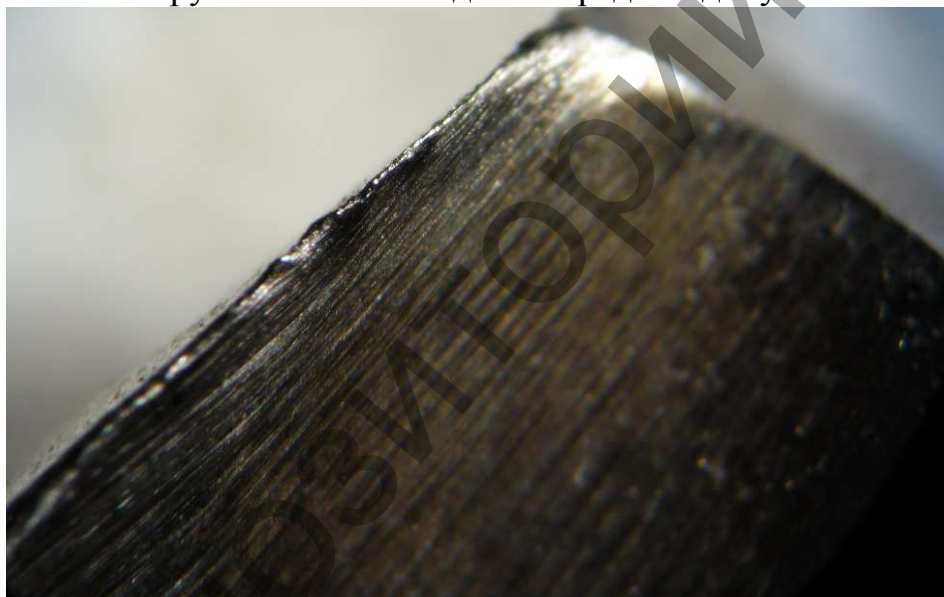


Рисунок 3 – Сколы на главной режущей кромке

В результате испытаний было доказана эффективность метода ИПА. Было установлено, что при азотировании повышается износостойкость, усталостная прочность, антикоррозионная устойчивость. Таким образом, применение ионно-плазменного азотирования для упрочнения режущего инструмента является эффективным, экономически выгодным и легко реализуемым.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Ионная химико-термическая обработка сплавов/Арзамасов Б.Н., Братухин А.Е., Елисе-ев Ю.С., Панайоти Т.Р. М.:Изд-во МГТУ им. Баумана, 1999. - 400 с.
2. Теория и технология азотирования/ Лахтин Ю.М., Коган Д.Я., Шпис Г.И. и др. М. Металлургия, 1991 – 320.

3. Формирование износостойких ионно-плазменных покрытий режущего инструмента/ Табаков В.П. М.: Машиностроение, 2008. – 311 с.; ил.

УДК 621.914.1

**РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ
ТЕПЛОНАПРЯЖЕННОСТИ ПРОЦЕССА ОБРАБОТКИ И
ВЕЛИЧИН ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ
ПРИ ФРЕЗЕРОВАНИИ ЗАГОТОВОК**

Евдокимов Д.В., Багрянцев Д.А.

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

Качество изделий, их надежность и долговечность во многом зависят от характера и величины остаточных напряжений, формируемых в поверхностном слое деталей при их изготовлении. Остаточные напряжения формируются как под действием силового, так и температурного полей, имеющих место в зоне обработки.

В предлагаемой работе представлена методика расчета теплонапряженности технологической системы при концевом фрезеровании, а также методика расчета остаточных напряжений в заготовке.

Методика расчета температурных полей в инструменте и заготовке, основана на использовании математической модели, позволяющей оценивать величины основных тепловых потоков, действующих в зоне резания, а также на использовании конечно-элементной модели, разработанной в модуле «CFX», универсальной программной системы конечно-элементного анализа «ANSYS». Последняя модель позволяет строить температурные поля в зоне резания при фрезеровании, с учетом гидродинамики СОЖ. Пример визуализации результата вычисления представлен на рисунке 1.

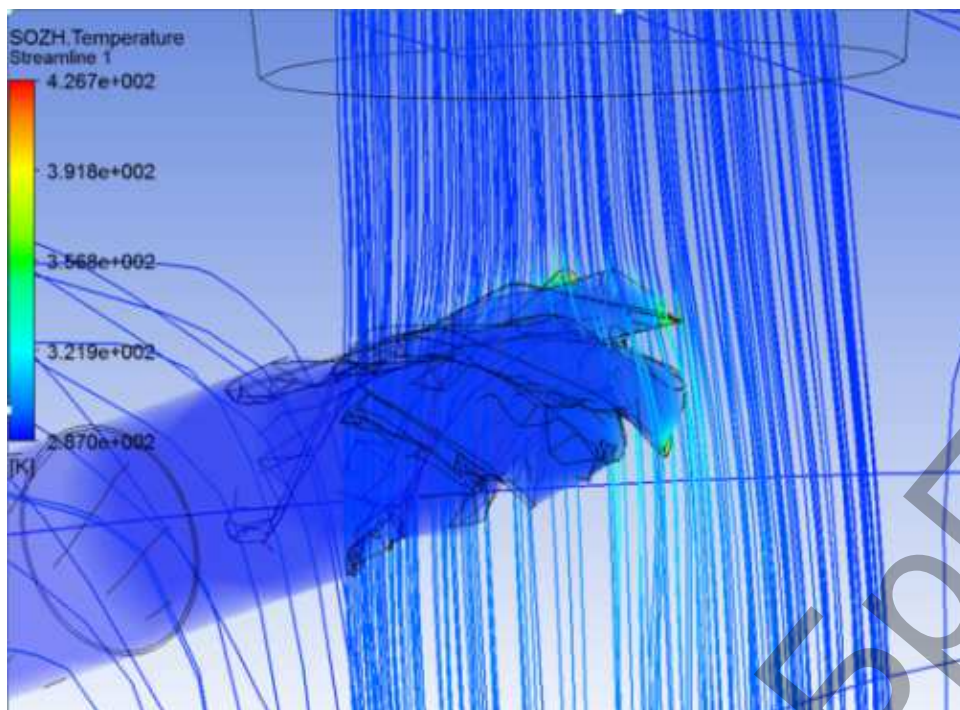


Рисунок 1 – Температурные поля, распределенные по виртуальной геометрии фрезы и виртуальному потоку СОЖ

Перед этапом определения величин плотностей тепловых потоков в зоне резания, определяются величины составляющих сил резания. Их определение основано на аналитическом способе, который основан на использовании феноменологической зависимости Джонсона-Кука. Методика по определению величин плотностей тепловых потоков в зоне резания имеет в своем алгоритме зависимости, которые требуют знание величин усадки стружки в зависимости от режимов обработки. Поэтому на основе экспериментальных данных об изменении величины коэффициента усадки стружки по режимам обработки была составлена программа и добавлена в расчетный алгоритм методики.

Методика по определению остаточных напряжений в поверхностном слое заготовки основывается на использовании компьютерной модели, разработанной в универсальной программной системе конечно-элементного анализа «ABAQUS». Вычисление величин остаточных напряжений, распределенных по поверхностному слою заготовки, ведется на основании четырех главных пунктов данных, прописанных в компьютерной модели: плотность материала заготовки, модель эластичности (включает в себя модуль Юнга, коэффициент Пуассона, объемный модуль упругости, жесткость при сдвиге), модель пластичности, которая представлена в виде феноменологической зависимости Джонсона-Кука, модель разрушения, которая представлена в виде феноменологической зависимости Джонсона-Кука. Однако определение коэффициентов феноменологических зависимостей, которые отражают поведение материала в зависимости от изменяющейся температуры, в разработанной компьютерной модели, не предусмотрено. Поэтому учет температурного влияния ведется за счет использования данных, получаемых по результатам вычислений компьютерной модели, позволяющей строить температурные поля в зоне резания.

Итогом работы является разработанная методика, позволяющая оценивать величины остаточных напряжений, формирующихся в поверхностном слое заготовок на операциях концевой фрезерования, с учетом теплонапряженности процесса. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ.

УДК: 621.9.049+ 621.785

РАЦИОНАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ И УПРОЧНЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ПРОФИЛЬНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Пантелеенко Ф.И., Данилов А.А., Спецман М.В.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Профильное моментопередающее соединение (ПМС) – это подвижное или неподвижное соединение с гарантированным зазором (натягом) или с переходной посадкой двух соосно расположенных деталей типа вал-втулка цилиндрической или конической формы с криволинейным поперечным сечением (рисунок 1).

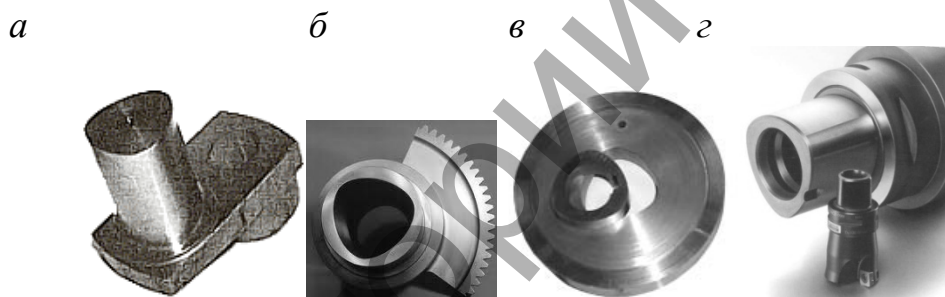


Рисунок 1 – Образцы деталей машин (а, б) и технологической оснастки (в, г) с профильными моментопередающими поверхностями

По сравнению со шлицевыми и шпоночными соединениями ПМС обладают существенными эксплуатационными преимуществами в отношении усталостной прочности, долговечности, уровня шума и других характеристик при меньшей на 30-40% себестоимости изготовления, обеспечивая снижение металлоемкости изделий и затрат на их производство. ПМС эффективны в силовых трансмиссиях и в точных кинематических цепях, в конструкциях режущих и вспомогательных инструментов, однако в отечественном машиностроении они применяются редко, что обуславливает актуальность решения задач научного и конструкторско-технологического обеспечения их производства, создания соответствующего оборудования и эффективных технологий изготовления, гарантирующих требуемую точность формы и размеров деталей и эксплуатационные характеристики соединения.

Учитывая многообразие возможных методов формообразования некруглых поверхностей (НП), актуальным является обоснованный выбор из известных или синтез рациональных методов с точки зрения простоты реализации, управ-

ляемости формообразованием для обеспечения качества обработки НП, что важно для проектирования технологий, станочного оборудования и режущих инструментов.

К рациональным относятся методы, основанные на двухэлементных движениях профилирования, не содержащих реверсивные элементарные движения, что обеспечивает упрощение кинематики станка, улучшение условий работы его исполнительных механизмов, повышение производительности и точности формообразования, а также позволяет реализовать эти методы на станках иного назначения.

В основу синтеза или выбора рациональных методов формообразования НП положены следующие принципы [1]:

- перенесение функции кинематики формообразования на инструмент и совмещение исполнительных движений для упрощения схемы обработки;
- оптимизация структуры исполнительных движений для создания благоприятных условий резания и работы механизмов станка, управления точностью формообразования за счет исключения реверсивных движений, введения дополнительных движений и т.д.;
- задание скоростей и направлений элементарных движений для стабилизации скоростей исполнительных движений и повышения производительности;
- обеспечение возможности управления формообразованием геометрическим и кинематическим методами для обеспечения требуемой точности и топологии обработанной поверхности и т.д.

На рисунке 2 показаны некоторые из удовлетворяющих этим принципам схем, особенностью которых является совмещение движений профилирования и резания, что позволяет реализовывать их на универсальных станках.

Например, по схеме *a* возможно полигональное точение НП на современных токарных многооперационных станках с ЧПУ. На ее основе разработаны способы полигонального формирования поверхностей с профилем в виде треугольника Рело.

Некруглый профиль по схеме *б* формируется некруглым или эксцентрично установленным круглым резцом. Во втором случае профиль поверхности не зависит от радиуса резца, что повышает точность формообразования. Профилирование НП по схемам *в*, *г* осуществляется некруглой или эксцентрично установленной круглой фрезой, соответственно цилиндрической или дисковой.

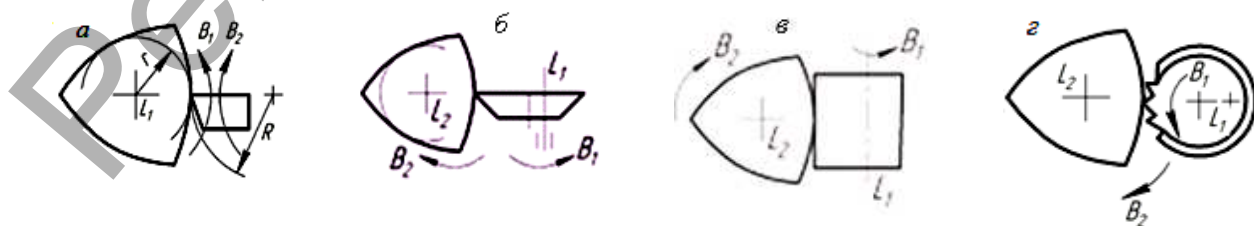


Рисунок 2 – Рациональные схемы профилирования НП методами следа (*a*), обката (*б*, *в*), касания (*г*)

Учитывая характерный для ПМС высокий уровень контактных напряжений на наиболее нагруженных участках рабочих поверхностей, технология изготовления деталей должна обеспечивать повышенную контактную жесткость неподвижных и износостойкость подвижных ПМС. Поэтому после придания детали требуемой формы, размеров и шероховатости рабочей поверхности важным является обеспечение ее заданных эксплуатационных свойств за счет упрочнения механическим или физико-техническим методом.

При выборе метода и схемы упрочнения деталей ПМС приняты во внимание следующие факторы:

1. Сложность геометрии деталей ПМС обуславливает необходимость применять методы упрочнения, после которых не требуется дополнительная обработка детали. Этому требованию отвечают методы поверхностно-пластического деформирования, а также основанные на воздействии высококонцентрированными потоками энергии, в частности, лазерным.

2. Форма НП деталей ПМС позволяет применять для их упрочнения те же методы, что и для круглых деталей. На этом основан разработанный способ выглаживания поверхностей деталей с профилем в виде треугольника Рело, формируемым полигональным методом аналогично точению.

3. Необходимо учитывать характер нагружения детали в ПМС, т.е. переменность удельного давления вдоль профиля детали, периодическое чередование участков с высоким уровнем удельного давления и участков, практически не участвующих в передаче крутящего момента. С учетом этого фактора разработаны схемы лазерного упрочнения деталей ПМС (рисунок 3).

4. Схема упрочнения должна соответствовать схеме нагружения детали. Так, цилиндрическое ПМС, нагруженное крутящим моментом, должно иметь повышенную контактную жесткость в тангенциальном направлении, что обеспечивается ориентацией лазерных дорожек параллельно оси детали, которые формируются на ее нагруженных участках (рисунок 3, *а*).

Детали конического ПМС нагружены как в тангенциальном, так и в осевом направлении, поэтому рациональной является винтовая форма лазерных дорожек (рисунок 3, *б*). В реверсивных ПМС (рисунок 3, *в*) упрочнённые участки должны располагаться по обе стороны от вершин НП, а в нереверсивных из экономических соображений – по одну сторону от них (рисунок 3, *г*).

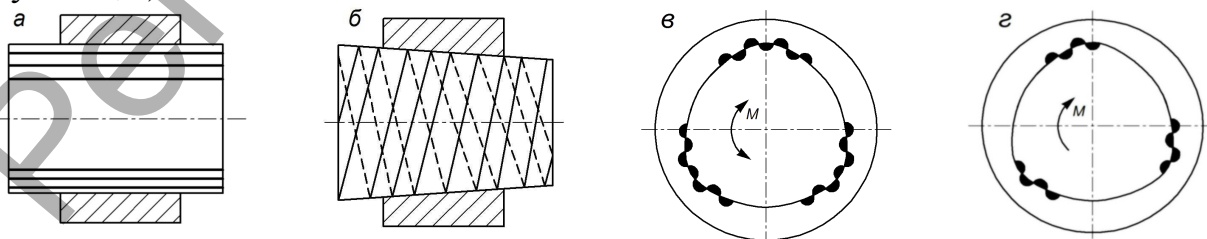


Рисунок 3 – Схемы лазерного упрочнения деталей цилиндрических (*а*) и конических (*б*) ПМС реверсивного (*в*) и нереверсивного (*г*) типов

На основе проведенного системного анализа установлено, что лазерное воздействие позволяет формировать в поверхностном слое структурно неоднородные участки с неравномерным распределением микротвёрдости и микропластических деформаций, что повышает сопротивляемость сдвигу сопряжённых деталей и контактную жёсткость соединения [2]. Это возможно в схемах упрочнения с формированием определённым образом расположенных лазерных дорожек.

На лабораторном комплексе на базе установки микроплазменного упрочнения МПУ4 выполнено упрочнение поверхностей образцов из сталей У8, Р6М5, 40Х и др. Полученные неравновесные структуры в поверхностном слое до 50 мкм позволили повысить его микротвёрдость и износостойкость.

Таким образом, в результате проведенного исследования установлены рациональные схемы обработки НП и упрочнения деталей ПМС. Исследования по оптимизации параметров их механической и упрочняющей обработки продолжаются.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Конструирование и оснащение технологических комплексов / А.М. Русецкий [и др.]; под общ. ред. А.М. Русецкого. – Минск : Беларус. навука, 2014. – 316 с.

2. Тескер, Е.И. Повышение надёжности неподвижных соединений лазерной модификацией сопрягаемых поверхностей / Е.И. Тескер, Ю.П. Сердобинцев, А.Г. Алёхин, С.Е. Тескер. // Вестник машиностроения. – 2015. – №4. – С. 4-8.

УДК 621.691.67-762

РАСЧЕТ ТОРЦОВОГО УПЛОТНЕНИЯ С КОНТАКТНЫМИ КОЛЬЦАМИ ИЗ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ КАРБИДА ВОЛЬФРАМА

Богданович Д.И., Волчик А.А., Голуб В.М.

Брестский государственный технический университет
Брест, Республика Беларусь

С развитием современного машиностроения требования, предъявляемые к уплотнительным устройствам, все время повышается. Важное значение имеет узел уплотнения нефтяных магистральных насосов. Бесперебойный транспорт нефти и нефтепродуктов по магистральным трубопроводам во многом зависит от надежной работы насосного агрегата и, в частности, наиболее ответственного узла центробежных магистральных насосов торцового уплотнения. Анализ работы насосного оборудования показывает, что число его отказов вследствие выхода из строя торцовых уплотнений в последние годы заметно снизилось [1].

Целью настоящей работы является моделирование торцового уплотнения типа УТН-120С в среде Autodesk Inventor и получение оптимальной геометрии контактных колец трения, а так же создание надежного, удобного при монтаже и эксплуатации торцового уплотнения, обеспечивающего герметизацию вала при давлении в камерах уплотнений работающего насоса.

Торцовое уплотнение включает основной рабочий узел уплотнения и резервный узел защиты от выброса нефти в насосное помещение.

На рисунке 1 представлена 3D модель торцового уплотнения типа УТН-120.



1 – кольцо неподвижное; 2 – кольцо вращающееся.

Рисунок 1 – 3D модель торцового уплотнения типа УТН-120

Проведем исследование прочностных характеристик контактных колец из карбида вольфрама. Композиционные материалы и покрытия на основе смесей, состоящих из тонкодисперсных порошков карбида вольфрама и кобальта (ВК-6, ВК-8). А так же в качестве сравнения возьмём контактные кольца из силицированного графита и проведем сравнительный анализ (таблица 1).

Таблица 1 – Свойства материалов

Показатели	Силицированный графит		Карбид вольфрама	
	СГ-П	СГ-Т	ВК6	ВК8
Плотность, г/см ³	2,5	2,4	280-360	280-360
Предел прочности при сжатии, МПа	300-320	420-450	1550	1700
Предел прочности при изгибе, МПа	90-110	110-120	122-135	122-135
Модуль упругости при сжатии, МПа	95	127	280-360	280-360

Под действием приложенного внешнего давления p контактное кольцо испытывает (Рисунок 2):

радиальное напряжение

$$\sigma_z = -p \quad (1)$$

кольцевые растягивающие напряжения

$$\sigma_k = p \cdot \frac{R_b^2}{R_H^2 - R_b^2} \cdot \left(1 + \frac{R_H^2}{R^2}\right) \quad (2)$$

Осевые напряжения от расклинивающего давления на контакте

$$\sigma_0 \cong \frac{1}{2} \cdot p \quad (3)$$

На внутренней поверхности контактного кольца при $R = R_b$ кольцевые напряжения достигают максимума

$$\sigma_k = p \cdot \frac{R_H^2 + R_b^2}{R_H^2 - R_b^2} \quad (4)$$

Согласно теории наибольших нормальных напряжений расчет ведут по максимальному растягивающему напряжению. Условие прочности по этой теории выражается неравенством:

$$\sigma_k \leq [\sigma_p] \quad (5)$$

Расчет для контактного кольца сведем в таблицу 2.

Таблица 2 – Результаты расчета

Давление p , МПа	Кольцевые растягивающие напряжения σ_k , МПа	Максимальное растягивающее напряже- ние $[\sigma_p]$, МПа	
		ВК-6	ВК-8
5	23,5	280-360	280-360
6	30,4		
7	35,5		
8	40,5		
9	45,6		
10	50,7		

Исходя из уравнения прочности, определим рабочее давление уплотняемой среды для композиционных материалов. Уравнение прочности имеет вид:

$$n \cdot p \cdot D_b \leq 2 \cdot \delta \cdot \sigma_1 \quad (6)$$

где δ – толщина стенки кольца;

$n = 1,15$ – коэффициент перезагрузки, значение которого принято с учетом пульсаций давления и динамической нагрузки контактного кольца;

p – рабочее давление в камере уплотнения;

σ_1 – расчетное сопротивление материала кольца;

$$\sigma_1 = \sigma_1^H \cdot k_1 \cdot m_1 \cdot m_2 \quad (7)$$

где σ_1^H – нормальное сопротивление растяжения, равное пределу прочности;

$k_1 = 0,85$ – коэффициент однородности материала;

$m_1 = 0,8$ – коэффициент условий работы материала при разрыве;

$m_2 = 0,9$ – коэффициент условий эксплуатации.

Из формулы (6) находим допустимое рабочее давление.

$$p_{\text{доп.}} \leq \frac{2 \cdot \delta \cdot \sigma_1}{n \cdot D_b} \quad (6)$$

Для колец торцового уплотнения из карбида вольфрама (ВК-6):

$$\rho_{\text{доп.}} = \frac{2 \cdot 0,0155 \cdot 280 \cdot 0,85 \cdot 0,8 \cdot 0,9}{1,15 \cdot 0,14} = 32,99 \text{ МПа.}$$

Для колец торцового уплотнения из карбида кобальта (ВК-8):

$$\rho_{\text{доп.}} = 32,99 \text{ МПа.}$$

Произведем сравнение карбида вольфрама с силицированным графитом. По формуле (6) рабочее давление для силицированного графита СГ-II равно $\rho_{\text{доп.}} = 2,83 \text{ МПа}$ и СГ-Т равно $\rho_{\text{доп.}} = 3,54 \text{ МПа}$ [2].

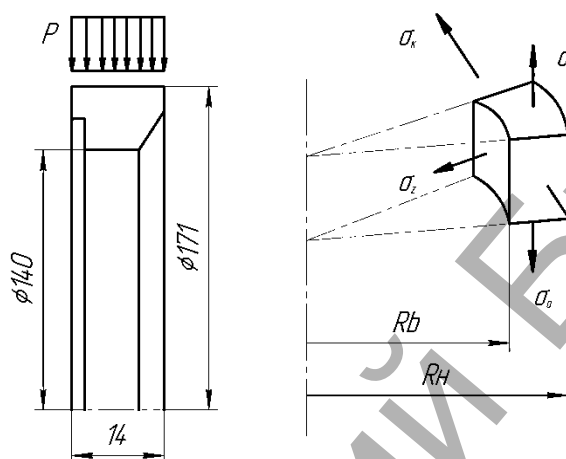


Рисунок 2 – Приложенные нагрузки

Можно сделать вывод что, контактные кольца из силицированного графита следует применять при давлении не более 3,5 МПа, что неудовлетворительно для современных магистральных трубопроводов, в которых максимальное давление может достигать 10 МПа. Торцовые уплотнения с контактными кольцами из композиционного материала на основе карбида вольфрама являются наиболее благоприятными для использования, так как применение данного материала позволяет выдерживать рабочие давления до 32 МПа.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Уплотнения и уплотнительная техника. Справочник. / Л.А. Кондаков, А.И. Голубев, В.В. Гордеев и др. Под общ. ред. А.И. Голубева, Л.А. Кондакова. –2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1994. –448 с.
2. Голуб М.В. Отчет по научно-исследовательской работе. Исследование условий работы уплотнений нефтяных магистральных насосов, обоснование параметров уплотнений. Брест, 1986.

УДК 637.5

СИСТЕМА МАШИН ДЛЯ МЯСОЖИРОВОГО ПРОИЗВОДСТВА. КЛАССИФИКАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ЛИНИЙ УБОЯ И РАЗДЕЛКИ СКОТА.

Ляшук Н. У., Титовец Р.А.

Брестский государственный технический университет
Брест. Республика Беларусь

Система машин — технически и экономически обоснованная совокупность средств производства для выполнения технологических процессов, необходимых для получения конкретного вида продукции в соответствии с перспективными требованиями потребителей [1].

Для разработки системы машин мясозирового производства необходимо иметь классификацию технологических линий по производительности. В настоящее время эта классификация отсутствует.

В СССР мясозировые производства оснащались оборудованием отечественного производства. В то время выпускались технологические линии убоя и разделки свиней производительностью 120 голов час и убоя КРС 25 голов в час [2]. В настоящее время основу мясозировых производств в мясной промышленности в странах СНГ составляют технологические линии и оборудование различной мощности импортного производства.

Основными критериями классификации линий по производительности являются наличие в мире моделей оборудования соответствующей производительности и экономическая целесообразность их применения.

Основанием для разработки классификации являются результаты исследований образцов технологического оборудования ведущих компаний мира и демонстрирующихся на международных выставках «Агропродмаш», «Молочная и мясная индустрия», проводимые в г. Москве; «Белагро», проводимая в г. Минске; коммерческие предложения компаний-изготовителей и поставщиков технологических линий для убоя и разделки скота; материалы тендеров и конкурсов на поставку оборудования; собственные разработки коммерческих предложений, предпроектных и проектных работ по созданию мясозировых предприятий за последние 20 лет.

Классификация технологических линий убоя и разделки КРС представлена в таблице 1.

Существует три технологических процесса переработки свиней: в шкуре, со снятием шкуры и со снятием крупона [3]. Однако в последние 25 лет в основном применяется процесс переработки свиней в шкуре. Поэтому остальные процессы в данной работе не рассматриваются.

Таблица 1 – Классификация технологических линий убоя и разделки КРС.

Пр-сть линий, голов/ч	Критерии классификации, характеристика применяемого оборудования	Применение линий
До 5	<ul style="list-style-type: none"> -Транспортирование туш и п/туш на подвесном пути вручную; -бокс универсальный простейшей конструкции с ручным управлением; -подъем туш на путь обескровливания электро- лебедкой; -совмещение технологических операций на одной площадке; -шкуроемка типа «снизу-вверх»; -инструмент простейшей конструкции; 	Применяется на животноводческих фермах в цехах санитарного убоя скота

До 25	-Транспортирование туш и п/туш на подвесном пути с помощью подвешенного конвейера; -бокс с фиксацией головы и туловища; -площадки подвижные для бойцов; -шкуротъемка типа «сверху-вниз»; -механизированный инструмент-транспортирование субпродуктов до позиций обработки на конвейерах;	Мясокомбинаты небольшой мощности; крупные животноводческие хозяйства
До 50	См. производительность до 25 голов в час, а также транспортирование отходов пневмотранспортом	Мясокомбинаты средней мощности
До 80	См. производительность до 50 голов в час, а также возможно применение роботов на операциях забеловки и распиловки туш	Крупные мясокомбинаты

В мире существуют линии убоя и разделки КРС производительностью до 300 голов в час. Однако в РФ и РБ максимальная производительность существующих линий составляет 80 голов в час, поэтому более производительные линии по мере их освоения будут дополнять настоящую систему машин.

Таблица 2 - Классификация линий убоя и разделки свиней по производительности

Пр-сть линии, голов/ч	Критерии классификации, характеристика применяемого оборудования	Применение линий
1	2	3
До 16	Характеристика применяемого оборудования: -транспортирование туш и п/туш на подвесном пути вручную; -бокс универсальный простейшей конструкцией; -подъем туш на путь обескровливания эл. лебедкой; -площадки для бойцов неподвижные; -мойка туш вручную; -обезволаживание скребмашиной, совмещенной со шпарчаном отечественного пр-ва; -опалка ручной газовой горелкой; -инструмент ручной;	Применяется на животноводческих фермах в цехах санитарного убоя скота; мясожировые предприятия малой мощности в животноводческих хозяйствах, в системе потребкооперации
1	2	3
До 25	См. производительность до 16 голов в час, а также обезволаживание скребмашиной совмещенной со шпарчаном европейских изготовителей.	Мясожировые предприятия малой мощности в животноводческих хозяйствах, в системе потребкооперации
До 40	См. производительность до 25 голов в час, а также: -подъем туш на подвесной путь подъемником элеваторного типа; -шпарка в роторном шпарчане погружением; -опалка в скребмашине совмещенной с опалкой; -возможно применение механизированного инструмента;	Мясожировые предприятия малой мощности в животноводческих хозяйствах

До 60	Характеристика применяемого оборудования: -транспортирование туш и п/туш на подвесном пути с помощью подвешенного конвейера; -бокс фиксирующий пневматический; -подъем туш на подвесной путь подъемником элеваторного типа; -мойка туш трехваловой бичевой мойки; -шпарка в роторном шпарчане удлиненной конструкции погружением; -опалка в скребмашине, совмещенной с опалкой; -инструмент механизированный; -транспортирование субпродуктов до позиций обработки на конвейерах;	Мясокомбинаты небольшой мощности; крупные животноводческие хозяйства
До 120	См. производительность до 60 голов в час, а также применяется отдельно порталная скребмашина и опалочная печь	Мясокомбинаты средней мощности
До 180	См. производительность до 120 голов в час, а также: -оглушение с помощью рестрайнер-бокса, возможно применение оглушения в CO ₂ ; -возможно применение вертикальной шпарки; -возможно применение винтовой скребмашины; -применение 8-вальной бичевой мойки; -транспортирование отходов пневмотрансп.	Крупные мясокомбинаты
До 250	См. производительность до 180 голов в час, а также: -оглушение с помощью рестрайнер-бокса, или в среде CO ₂ ; -вертикальная шпарка; -винтовая скребмашина; -8-вальная бичевая мойка;	Крупные мясокомбинаты
Свыше 250	См. производительность до 180 голов в час, а также: применение роботов на операциях распиловки туш на п/туши, отрезания головы и конечностей	Крупные мясокомбинаты

В РФ существуют мясозировые производства убоя и разделки свиней производительностью до 400 голов в час. В мире существуют производства до 2000 голов в час. Более производительные линии по мере их освоения будут дополнять настоящую систему машин.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Машины и аппараты пищевых производств. В 2-х кн. / С. Т. Антипов, И. Т. Кретов, А.Н. Остриков и др.; Под ред. В.А. Панфилова. – М.: Высшая школа, 2001. 1527с.
2. Оборудование для мясной и птицеперерабатывающей промышленности. Отраслевой каталог. ЦНИИТЭИлегпищемаш. Москва – 1986 г.
3. Мясозировое производство: убой животных, обработка туш и побочного сырья. Под ред. Лисицына А. Б. – М.: ВНИИ мясной промышленности. 2007.

УДК 620.192.63

ОБЗОР НЕРАЗРУШАЮЩИХ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ СТЫКОВЫХ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К КАРДАННОМУ ВАЛУ

Лежава А.Г., Трайгель А.С.

Гродненский государственный университет имени Янки Купалы,
Гродно, Республика Беларусь

В статье рассматривается возможность применения основных неразрушающих физических методов контроля сварного соединения карданного вала. Произведено сравнение данных методов. Выявлены их основные преимущества и недостатки. Разработана методика ультразвукового контроля и получены первые предварительные результаты.

Одной из причин нарушения работы карданного вала является разрушения сварных швов, соединяющих вилку и втулку с трубой. В основном это происходит из-за наличия дефектов, которые могут образоваться при проведении сварки и соответствующего термического воздействия в сварном шве, а также участках, прилегающих к нему.

Наружные дефекты сварных соединений могут быть выявлены при визуальном осмотре, а для выявления внутренних используют различные физические методы неразрушающего контроля такие как радиационные, магнитные, ультразвуковые и др.

Работа выполнялась для карданного вала с трубой наружным диаметром 89 мм. Рассматриваемое сварное соединение приведено на рисунке 1.

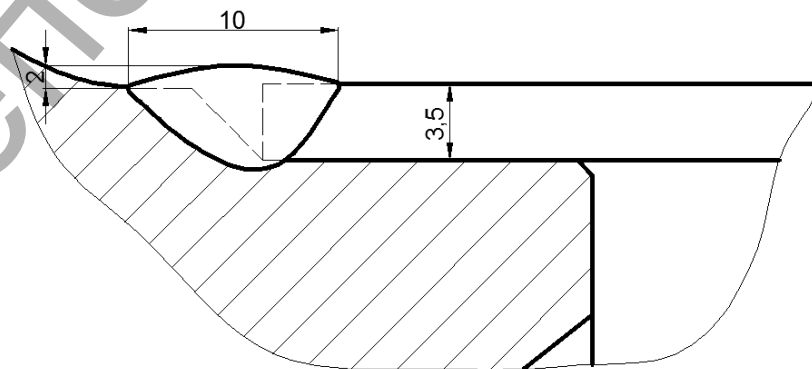


Рисунок 1 – Сварное соединение карданного вала.

Рассмотрим методы неразрушающего контроля применительно к данному сварному соединению и его геометрическим размерам.

Радиационный метод контроля. Применение данного метода к нашему сварному соединению имеет следующие преимущества – точность определения вида дефекта, невысокая требовательность к чистоте поверхности, наглядность. Недостатками данного метода являются: необходимость просвечивания под углом к плоскости стыка, что снижает чувствительность к плоским дефектам; суммарная толщина просвечиваемого металла (две толщины стенки трубы плюс металл вилки) большая, что значительно уменьшает чувствительность. К недостаткам также относится создание отдельных помещений для контроля, вредные условия труда для оператора [1].

Магнитный метод эффективен при небольшой толщине металла и обнаруживает трещины, непроваренные участки, разрывы и крупные поры. Он прост и не требует значительных затрат. Среди недостатков можно выделить то, что дефекты, расположенные параллельно плоскости поверхности (трещина, расслоение), выявляются плохо. К тому же существенное влияние оказывает форма деталей рассматриваемого соединения, искажающая магнитный поток [1-3].

Ультразвуковой метод основан на способности к отражению звуковых волн ультразвукового диапазона. Он является оперативным, позволяет выявить дефекты как на поверхности изделий так и внутренние, безопасен для исполнителей и окружающих, затраты на его применение невелики, относительно легко поддается автоматизации, не требует громоздкого оборудования. Кроме того его можно легко и без больших переделок встроить в процесс производства карданных валов. Среди недостатков данного метода можно выделить то, что поверхность ввода изделия должна быть ровной и гладкой [3-4].

Среди рассмотренных выше методов наиболее целесообразно использовать ультразвуковой, с применением раздельно-совмещенной схемы (рисунок 2).

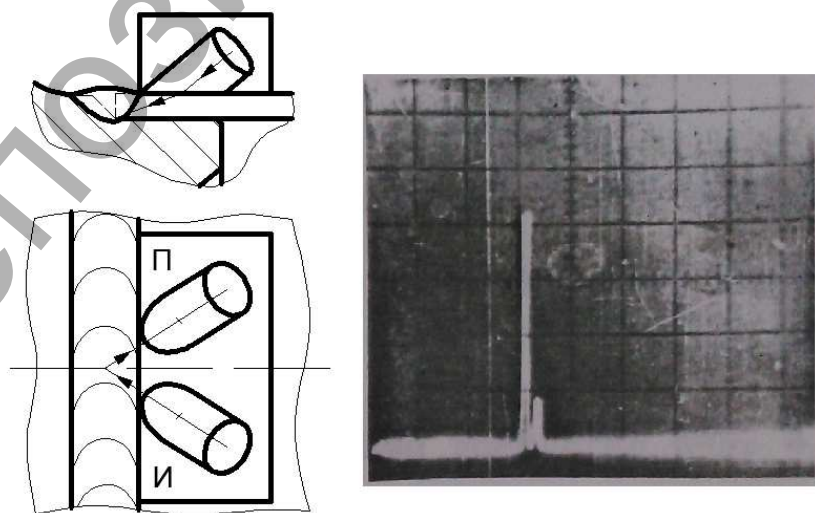


Рисунок 2 – Раздельно-совмещенная схема

Основное преимущество раздельно-совмещенной схемы – низкий уровень помех, особенно помех самого преобразователя, что позволяет контролировать малые толщины.

Применение хордовой схемы приводит к увеличению угла ввода, а значит и к увеличению мешающей поверхностной волны в ущерб поперечной, сильно увеличиваются и размеры ПЭП.

В данной работе применена раздельно-совмещенная схема с выровненной чувствительностью по толщине. Схема спроектирована таким образом, что дефекты в корневой части шва выявляются лучами верхней части призмы, а в верхней части шва – нижней части.

Была проведена практическая работа, заключающаяся в выявлении дефектов разработанным ультразвуковым пьезоэлектрическим преобразователем и сравнение полученных результатов с дефектами, выявленными при вскрытии. Настройку браковочного уровня чувствительности производили по зарубке размером 2,0*0,5 мм. Получены предварительные результаты (рис. 3). На рисунке виден выявленный непровар.



Рисунок 3 – Сварной шов в разрезе

Результаты проведенной работы показывают возможность применения ультразвукового метода для неразрушающего контроля сварного соединения карданного вала.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Волченко, В.Н. Контроль качества сварки / В.Н. Волченко, А.К. Гурвич, А.Н. Майоров, Л.А. Кашуба, Э.Л. Макаров, М.Х. Хусанов – М.: 1975. – 328с.
2. Банов, М.Д. Сварка и резка материалов: учебное пособие / [М. Д.Банов, Ю. В.Казаков, М. Г.Козулин и др.]; под ред. Ю. В.Казакова. – 9-е изд., стер. – М. : Издательский центр «Академия», 2010. – 400 с.
3. Ермолов, И.Н. Ультразвуковой контроль / И.Н. Ермолов, М.И. Ермолов – М.: 1998. – 171с.
4. Неразрушающий контроль: справочник: в 7т / под общ. Ред.: В.В. Клюев. – Т. 3: Ультразвуковой контроль / И.Н. Ермолов, Ю.В. Ланге. – М.: Машиностроение, 2004. – 864с.

**ИНЖЕНЕРИЯ ПОВЕРХНОСТИ.
СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ РАСЧЕТА ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ И
НАПРЯЖЕНИЙ**

Репозиторий БРГТУ

ОТДЕЛОЧНАЯ МАГНИТНО-АБРАЗИВНАЯ ОБРАБОТКА ТЕЛ ВРАЩЕНИЯ ИЗ ТРУДНООБРАБАТЫВАЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ

*Пантелеенко Ф.И.¹, Пантелеенко Е.Ф.¹,
Быстренков В.М.², Петришин Г.В.²*

1) Белорусский национальный технический университет,
Минск, Республика Беларусь

2) Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого,
Гомель, Республика Беларусь

Одним из наиболее эффективных методов повышения срока службы быстроизнашивающихся деталей в машиностроении и приборостроении является нанесение на их рабочие поверхности защитных или восстанавливающих покрытий. Как правило, эти покрытия обладают высокой твердостью, износостойкостью, коррозионной стойкостью. Однако такой комплекс свойств, обеспечивающий высокие эксплуатационные показатели изделия, создает значительные трудности при их механической обработке, необходимой для обеспечения требуемых параметров по точности и шероховатости. При этом наибольшая трудоемкость в технологическом процессе механической обработки наблюдается на отделочных операциях.

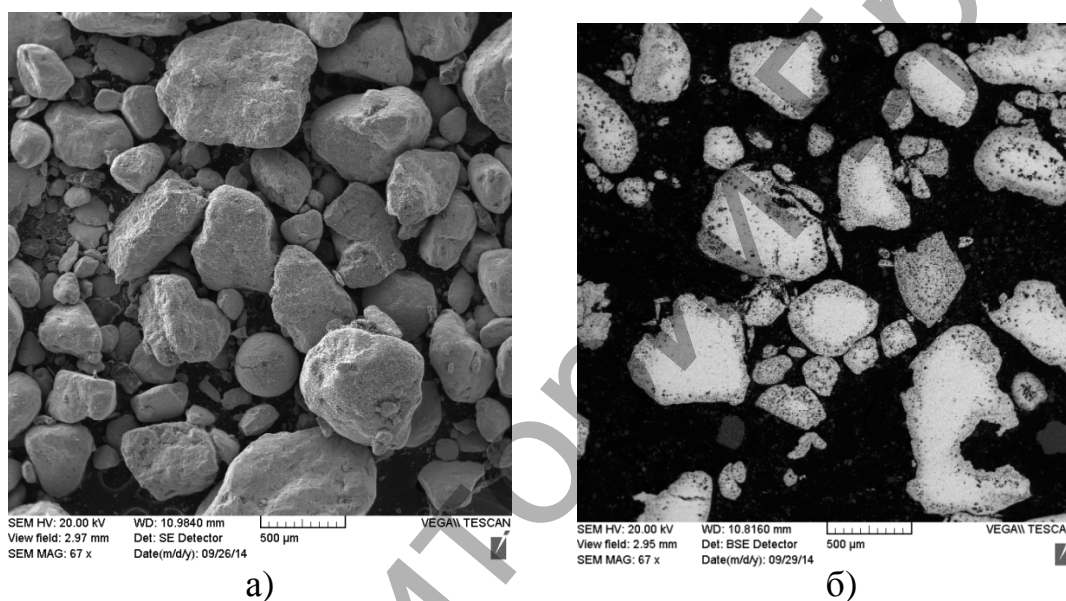
В машиностроении наиболее характерными элементами, имеющими высокие требования к качеству поверхности и подвергающимся ускоренному изнашиванию, являются сопрягаемые детали гидросистем. Опыт изготовления точных изделий с нанесенными износостойкими покрытиями показал, что операции отделочной обработки занимают не менее 80% штучного времени всей механической обработки. Столь высокую трудоемкость обуславливает высокая стойкость покрытий к абразивному изнашиванию, а также высокое содержание в материале покрытий никеля, приводящего к быстрому засаливанию шлифовального круга.

Ввиду этого актуальной является задача повышения производительности отделочной обработки труднообрабатываемых материалов при сохранении требуемых показателей шероховатости поверхности и точностных параметров детали. Наибольший интерес представляет исследование эффективности применения отделочной магнитно-абразивной обработки деталей круглого профиля с нанесенными на их рабочие поверхности защитными износостойкими покрытиями из порошковых смесей на основе сплава системы Ni-Cr-B-Si с твердостью покрытий 56...58 HRC_э, обеспечивающих высокую коррозионную и абразивную стойкость деталей.

Известно, что на производительность процесса магнитно-абразивной обработки существенное влияние оказывает характеристика применяемых ферромагнитных абразивных материалов. Так как для данной технологии абразивные материалы должны обладать не только высокой твердостью, но и иметь высокую магнитную проницаемость, существуют трудности при производстве таких материалов. Наиболее широкое применение в технологии магнитно-абразивной обработки получили спеченные порошковые материалы, состоящие из ферро-

магнитной основы и абразивных включений, обеспечивающих процесс съема металла. Однако такие материалы, обеспечивая высокое качество поверхностного слоя обработанной детали, имеют низкую стойкость и требуют замены после нескольких циклов обработки, что значительно повышает трудоемкость процесса и снижает его производительность.

Исследования производительности процесса магнитно-абразивной обработки тел вращения из стали 45 твердостью 45...48 HRCэ с использованием новых ферромагнитных абразивных порошков на основе борированных дисперсных металлических отходов показали высокую эффективность данных материалов при отделочной обработке поверхностей. Борированные порошковые материалы имеют высокие магнитные свойства за счет ферритной основы и значительную твердость поверхности, которую обеспечивают бориды железа FeB и Fe₂B (рисунок 1).



а)

б)

Рисунок 1 – Морфология борированного порошка на основе колотой чугуной дробы (а) и микроструктура его частиц (б)

На рисунке 1, б хорошо заметен темный боридный слой, представляющий собой в основном фазу Fe₂B. Режущие свойства данных порошковых материалов обуславливает именно фаза Fe₂B, обладающая микротвердостью 13,5...14,5 ГПа. В исходном состоянии борированные абразивные материалы имеют на поверхности и более твердую фазу FeB толщиной до 5 мкм и микротвердостью 21...22 ГПа, однако данная фаза обладает высокой хрупкостью и разрушается в самом начале магнитно-абразивной обработки. Предыдущие исследования показали высокую эффективность борированных порошков на основе колотой чугуной дробы при обработке улучшенной стали 45, однако технология магнитно-абразивной обработки и материалы для нее не применялись для обработки сплавов, обладающих высокой износостойкостью.

Исследования проводились на цилиндрических образцах диаметром 50 мм, длиной 20 мм. Материал образцов – сталь 45 с покрытием из порошковой смеси следующего химического состава: Ni - 70 масс.%, Cr- 18 масс.%, Si – до 1

масс.% , В - 4 масс.%. Исходная шероховатость поверхности образцов – Ra 2.5 мкм, после токарной обработки. Режимы магнитно-абразивной обработки: частота вращения детали – 1140 об/мин, скорость подачи 0,05 мм/об, магнитная индукция в рабочем зазоре без порошка – 0,50 Тл. В качестве ферромагнитных материалов – аналогов использовались спеченные порошковые материалы на основе железа и белого электрокорунда, нитрида кремния и нитрида алюминия. Для оценки производительности обработки в сравнении с традиционными отделочными технологиями образцы шлифовались на универсальном круглошлифовальном станке кругом марки 25A F46 L V35.

Исследования показали, при магнитно-абразивной обработке порошками на основе железа и электрокорунда скорость съема металла составляла 0,8 мкм/мин, а при работе порошками на основе железа, спеченного нитридом кремния и нитридом алюминия, скорость съема достигает 1,0 мкм/мин. При этом производительность обработки на круглошлифовальной операции составляет 1,0...1,2 мкм/мин. Однако в процессе магнитно-абразивной обработки не требуется правка инструмента, так как одной отличительных особенностей этой технологии является процесс самозатачивания. Повысить производительность процесса магнитно-абразивной обработки удалось за счет применения новых диффузионно-борированных материалов на основе колотой чугуновой дроби. Высокие магнитные свойства данных материалов позволили получить жесткий абразивный инструмент с высокой твердостью зерна, что значительно повысило производительность магнитно-абразивной обработки. Так, применение таких порошков зернистостью 0,315...0,400 мм показало производительность обработки опытных деталей 1,8...1,9 мкм/мин, обеспечив снижение шероховатости с Ra 2.5 мкм до Ra 0,50 мкм. Изменение фракционного состава до 0,200...0,315 мм снизило производительность до 1,7 мкм/мин, но позволило получить требуемую шероховатость Ra 0,32 мкм за счет того, что в процессе обработки частицы раскалываются, таким образом, формируя новые режущие поверхности. Лабораторные исследования по обработке экспериментальных деталей с износостойкими покрытиями из порошковой смеси системы Ni-Cr-Si-B твердостью 56...58 HRCэ показали снижение трудоемкости отделочной обработки с 220...240 мин при круглом шлифовании до 90...100 мин при магнитно-абразивной обработке борированными материалами на основе дисперсных металлических отходов с частицами неправильной формы.

Кроме того, была исследована возможность выполнения операций магнитно-абразивного полирования тел вращения из труднообрабатываемых материалов, так как для некоторых изделий шероховатость поверхности является фактором, влияющим на их эксплуатационные характеристики. Применение в процессе магнитно-абразивной обработки ферромагнитных абразивных материалов фракции 0,063...0,080 мм позволило снизить шероховатость поверхности с Ra 0,32 мкм до Ra 0,09 мкм.

Таким образом, исследования показали, что магнитно-абразивная обработка труднообрабатываемых материалов борированными порошками на основе дисперсных металлических отходов эффективнее традиционной круглошлифо-

вальной обработки. Данная технология позволяет достигать шероховатости Ra 0,09 мкм, а также обеспечивает производительный съём поверхностных слоев износостойких покрытий с обеспечением требуемой точности и шероховатости поверхности.

УДК 621.785.5

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА БОРИРОВАНИЯ НА ХРУПКОСТЬ БОРИДНЫХ СЛОЕВ НА СТАЛЯХ У8А И 9ХС

Константинов В.М., Дашкевич В.Г., Ковальчук А.В.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Исследование хрупкости диффузионных боридных слоев является сложной задачей, так как для ее оценки пока нет единых, общепризнанных методов, позволяющих получать абсолютные значения показателей хрупкости боридных слоев на разных сталях. Это связано с изменением хрупкости боридных слоев в широком диапазоне в зависимости от толщины слоя, его морфологии и соотношения фаз, условиями насыщения, состава стали и другим [1]. Поэтому задачи определения хрупкости боридных слоев традиционно решаются в каждом конкретном случае с получением сравнительных результатов. Такие данные имеют значительный практический интерес, так как при внедрении разрабатываемых технологий упрочнения стальных деталей с использованием борирования в производственный цикл, необходимым условием является воспроизводимость результатов обработки (получение низкой хрупкости боридных слоев), а также статистическая управляемость операций технологического цикла при определенных граничных условиях: температуре насыщения, времени выдержки, получаемой толщине боридного слоя.

Наиболее показательной характеристикой хрупкости борированных слоев следует считать минимальное напряжение, приводящее к появлению трещин или скола на различном расстоянии от поверхности образца. Поэтому хрупкость борированного слоя оценивалась по методике [2]. Согласно этой методике хрупкость оценивается по напряжению скола σ (МПа) слоя, которое в совокупности учитывает фазовый состав и морфологию слоя, микротвердость и модули упругости фаз, напряженное состояние слоя и запас пластичности (формула 1):

$$\sigma = 0,174 \cdot P / (2 \cdot l^2 + l \cdot l_c), \quad (1)$$

где P – нагрузка, Н; l – минимальное расстояние от центра отпечатка алмазной пирамиды до края образца, мм; l_c – длина диагонали отпечатка пирамиды, мм.

Оценка хрупкости проводилась при нагрузке 1,0 Н, которая способна образовывать трещину на межфазной границе для всех образцов, что предварительно установлено опытным путем. Вероятность появления трещины оценивалась как

отношение числа уколов индентора, приводящих к появлению трещин на межфазной границе к общему числу уколов.

Для достоверности статистического определения показателей хрупкости и оценки их статистической управляемости проводилось исследование однородности статистических оценок напряжения скола на межфазной границе согласно методикам [3]. При этом определялись однородность и равномерность результатов оценки хрупкости боридных слоев по напряжению скола.

Было установлено, что полученные по эмпирическим данным значения среднеквадратичных и средневыборочных отклонений являются однородными. Исходя из этого, выборки с результатами определения хрупкости боридных слоев по напряжению скола на межфазной границе также являются однородными. То есть хрупкость компактных двухфазных боридных слоев на сталях У8А и 9ХС, оцениваемая по напряжению скола на межфазной границе, является статистически управляемой [4] и может быть использована в качестве параметра оптимизации.

По полученным эмпирическим данным получены уравнения множественной регрессии зависимости хрупкости компактных двухфазных боридных слоев на сталях У8А (формула 2) и 9ХС (формула 3) от температуры насыщения и времени выдержки при борировании в порошковой среде, что позволяет определить параметры проведения процесса борирования, обеспечивающие получение наименее хрупких боридных слоев по показателю напряжения скола на межфазной границе FeV/Fe₂V (приложение А):

$$Y = 886.7 - 0.95 \cdot X_1 - 47.1 \cdot X_2 + 1.63 \cdot X_3 \quad (2)$$

$$Y = 404.8 - 0.36 \cdot X_1 - 20.3 \cdot X_2 + 0.53 \cdot X_3 \quad (3)$$

где Y – напряжение скола на межфазной границе FeV/Fe₂V, МПа; X_1 – температура насыщения, °С; X_2 – время выдержки, ч; X_3 – общая толщина боридного слоя, мкм.

Построены трехмерные графики, отражающие зависимости толщины боридного слоя и напряжения скола на межфазной границе от режимов борирования для сталей У8А 9ХС (рисунок 1) и позволяющие определить оптимальные диапазоны параметров проведения процесса борирования, обеспечивающие получение наименее хрупких боридных слоев по показателю напряжения скола на межфазной границе FeV/Fe₂V для сталей У8А и 9ХС.

Установлено, что наименее хрупкими на стали У8А являются боридные слои, полученные в результате насыщения при 920...950 °С, 1...1,5 ч с предварительной изотермической выдержкой 750 °С, 1 ч.

Для стали 9ХС наименее хрупкими оказываются слои, получаемые при 930...950 °С, 0,8...1,3 ч и 900 °С, 2...2,5 ч с предварительной изотермической выдержкой 750 °С, 1 ч.

Из полученных уравнений множественной регрессии и построенных зависимостей можно сделать вывод, что снижение температуры насыщения или повышение времени выдержки относительно выделенного оптимума для сталей У8А и 9ХС сопровождается повышением их хрупкости – снижается величина

предельной нагрузки, приводящей к появлению сколов и трещин на межфазной границе.

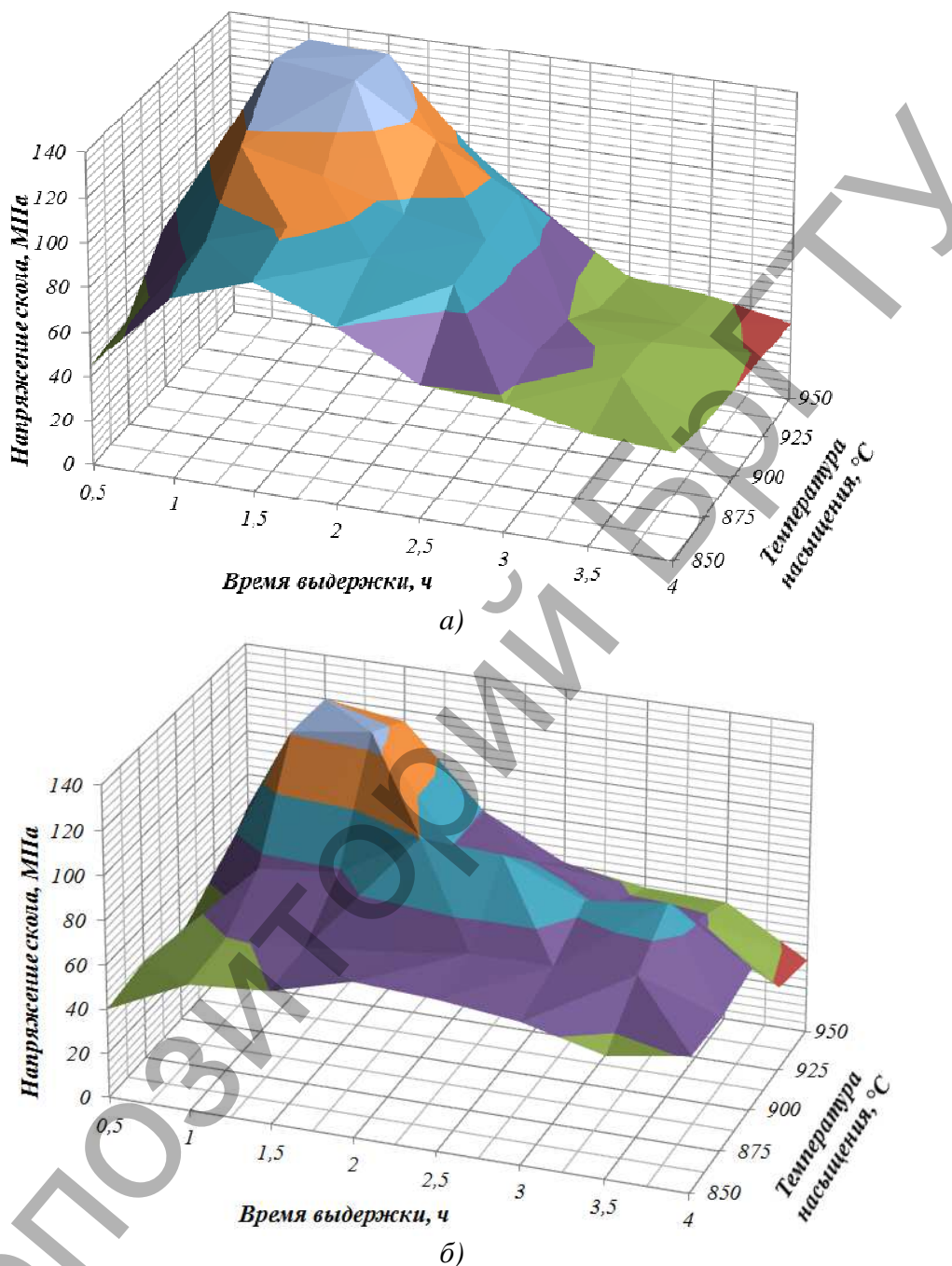


Рисунок 1 – Зависимости напряжения скола на межфазной границе от режимов борирования для сталей У8А (а) 9ХС (б)

По определенным из полученных результатов оптимальным режимам двухфазного борирования были получены образцы сталей У8А и 9ХС с диффузионными боридными слоями толщиной соответственно 125 и 110 мкм и микротвердостью поверхности 16600 и 16850 МПа. Соотношение толщин зон фаз FeB/Fe₂B в диффузионном слое составило 50/50 для обеих сталей. Величина напряжения скола на межфазной границе FeB/Fe₂B боридных слоев составила 137 МПа на стали У8А и 124 МПа на стали 9ХС.

Таким образом, получены новые уравнения регрессии зависимости хрупкости компактных двухфазных боридных слоев на сталях У8А и 9ХС от температуры насыщения и времени выдержки при борировании в порошковой среде, что позволило определить параметры проведения процесса борирования, обеспечивающие получение наименее хрупких (более работоспособных) боридных слоев по показателю напряжения скола на межфазной границе FeV/Fe₂V на уровне 120...140 МПа.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Konstantinov, V.M. Surface engineering of slider valves of fluid power motors made of tool steels by using boriding saturation mixture / V.M. Konstantinov, V.G. Dashkevich, A.V. Kovalchuk // Agricultural Engineering. – 2015. – Vol. 47. – P. 1–6.
2. Григоров, П.К. Методика определения хрупкости борированного слоя / П.К. Григоров, Б.Б. Катханов // В кн.: Повышение надежности и долговечности деталей машин. – Ростов н/Д., 1972. – Вып. 16. – С. 97–98
3. Аладьев, В.З. Курс общей теории статистики / В.З. Аладьев, В.Н. Харитонов – United States: Fultus Books, 2006. – 255 с.
4. Константинов, В.М. Исследование однородности статистических оценок хрупкости боридных слоев на сталях У8А и 9ХС по напряжению скола на межфазной границе / В. М. Константинов, В. Г. Дашкевич, А. В. Ковальчук // *Металлургия : республиканский межведомственный сборник научных трудов.* – Минск: БНТУ, 2015. – Вып. 36. – С. 235–242.

УДК 621.785.5

УПРАВЛЕНИЕ СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЕМ И ФАКТОР АКТИВАЦИИ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ В ПОРОШКОВЫХ СРЕДАХ

Дашкевич В.Г., Ковальчук А.В.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Химико-термическая обработка (ХТО) используется в различных отраслях машиностроения для повышения надежности и долговечности широкого ассортимента деталей машин и инструмента, позволяет получать на поверхности изделия слой, отличающийся от сердцевины и обеспечивающий необходимый комплекс физических, химических и механических свойств.

В настоящее время накоплен огромный опыт по применению различных видов и способов ХТО [1]. Тем не менее, получение специальных диффузионных слоев с особой морфологией слоя по-прежнему является актуальной задачей. Целью настоящей работы являлся поиск предпосылок получения при химико-термической обработке структур, значительно отличающихся от традиционных. В частности для таких процессов как борирование и азотирование.

На примере борирования выделено несколько направлений термодиффузионной обработки в порошковых средах функционально способных изменить структуру диффузионного слоя и получить морфологию отличающуюся от классической:

1. Предварительная обработка поверхности перед насыщением. Это различного рода гальванические покрытия, в частности, меднение, никелирование, цинкование, имеющие, как правило, дефектность в виде открытой пористости. Так же разнообразная предварительная активация поверхности, например, механоактивация или прошивка сгустком порошковых частиц (рисунок 1). Предварительная активация поверхности материала деталей на значительные глубины перед насыщением, приводит к последующему зональному ускорению процесса диффузии легирующих элементов вглубь матричного материала и созданию таким образом своего рода композиционного покрытия с особой морфологией слоя.

2. Управление непосредственно процессом ХТО, т.е. температурно-временными параметрами обработки (в том числе реализация термоциклирования), составом насыщающей среды и активаторами, управление вязкостью плавкого затвора с целью создания соответствующего парциального давления, а также интенсификация подвода активной среды непосредственно к поверхности насыщаемого металла за счет перевода порошковой смеси в псевдооживленное (кипящее) состояние [2].

Необходимо отметить, что рекомендуемая рецептура насыщающих сред и режимы обработки для многокомпонентного насыщения, приводимые в литературе, колеблются в широких пределах и их практическое использование без дополнительных исследований невозможно.

3. Последующая после насыщения термическая и химико-термическая обработка, которая может приводить, например к коагуляции структурных составляющих.

Необходимо отметить, что выявить значимость всех перечисленных факторов на практике очень трудно, тем более, что исходно на обработку поступают изделия разного материального исполнения. В тоже время, накопленный авторский опыт в области борирования показывает не только принципиальную возможность получения неклассических структур, но и высокую степень повторяемости экспериментов.



Рисунок 1 – Микроструктура стали с сформировавшейся канальной зоной от прошивки сгустком порошковых частиц (активация поверхности), $\times 800$

Что касается применимости таких слоев, то, например, получение при борировании некомпактных боридных слоев и конгломерата боридных фаз на конструкционных сталях позволяют минимизировать хрупкость слоя и получать достаточно высокие физико-механические и эксплуатационные характеристики борированной поверхности [3] (рисунок 2, а).

Еще одним характерным примером нетрадиционных боридных слоев является структура, где бориды железа при длительной выдержке проникают в твердый раствор. Происходит «погружение» боридов (рисунок 2, б), такое явление исследователи объясняют тем, что образовавшиеся на поверхности бориды неустойчивы и как следствие в диффузионном слое происходит достройка кристаллической решетки борида в глубь слоя с соответствующим смещением фазовой границы [4].

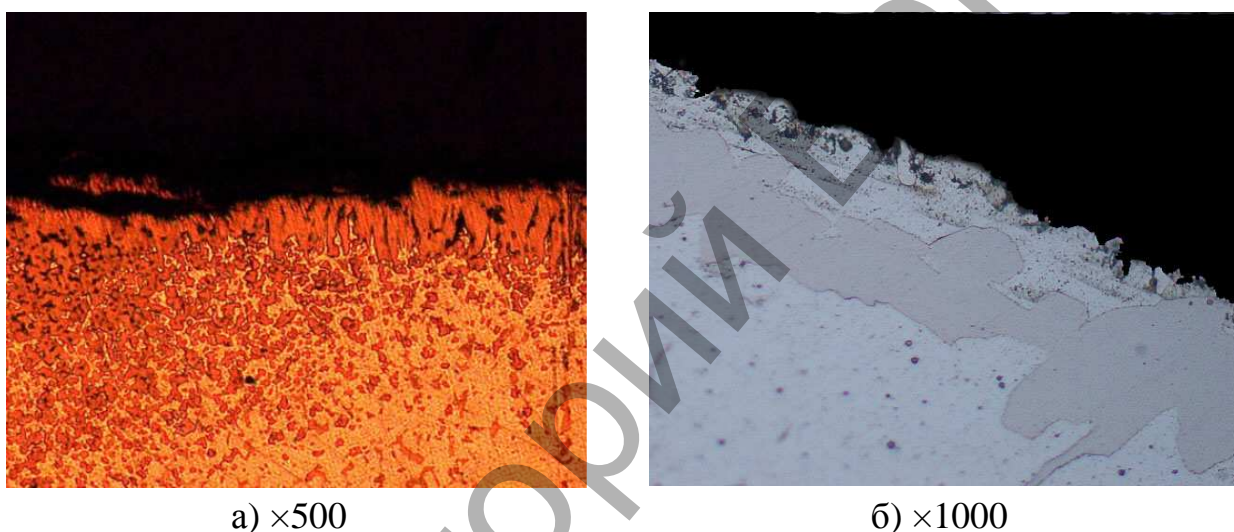


Рисунок 2 – Микроструктура нетрадиционных диффузионных боридных слоев: а) с конгломератом боридных фаз; б) с «погруженными» в твердый раствор боридами железа

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Минкевич, А.Н. Химико-термическая обработка металлов и сплавов / А.Н. Минкевич. – М.: Машиностроение, 1965. – 491 с.
2. Дашкевич, В.Г. К вопросу повышения энергоэффективности операций химико-термической обработки в виброкипящем слое / В.Г. Дашкевич, Д.В. Гегеня // Новые функциональные материалы, современные технологии и методы исследования: материалы III Республиканской научно-технической конференции молодых ученых, Гомель, 4 – 6 ноября 2014 г. – Гомель: ИММС НАН Беларуси, 2014. – 29 – 30 с.
3. Крукович, М.Г. Пластичность борированных слоев / М.Г. Крукович, Б.А. Прусаков, И.Г. Сизов. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010. – 384 с.
4. Мельник, П.И. Диффузионное насыщение железа и твердофазные превращения в сплавах / П.И. Мельник. – М.: Металлургия, 1993. – 128 с.

СОВРЕМЕННЫЕ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ СОЕДИНЕНИЙ И ИНЖЕНЕРИИ ПОВЕРХНОСТИ

Поболь И.Л., Поболь А.И., Леонович С.С.

Физико-технический институт НАН Беларуси, Республика Беларусь

Введение. Активное использование электронно – лучевой (ЭЛ) обработки материалов началось в середине 1950-ых годов для выплавки особо чистых металлов и сплавов, получения соединений сваркой ответственных изделий, нанесения покрытий испарением материалов и их осаждением и т.п. Сегодня в промышленно развитых странах мира происходит совершенствование ЭЛ оборудования и разрабатываются технологии, постоянно появляются новые разработки для применения в различных сферах. Рынок использования ЭЛ технологий составляет многие сотни миллиардов долларов. Суть всех ЭЛ технологий – улучшение, иногда значительное, свойств обработанных материалов или изделий в результате воздействия на них потока электронов, изготовление узлов и конструкций, которые другими методами не могут быть получены.

Методы ЭЛ обработки обладают целым рядом технологических преимуществ перед вариантами плавки, сварки и поверхностного воздействия, использующих другие источники энергии: высокая пространственно-временная точность и воспроизводимость подачи энергии; отсутствие окисления и обезуглероживания материала изделия; высокая надежность электромагнитной системы перемещения луча, легкая возможность автоматизации управления процессом; высокий КПД нагрева (более 75%); экологическая чистота; возможность использования одного оборудования для проведения различных технологических процессов — сварки, поверхностной закалки, плавления.

Исследования в ФТИ НАН Беларуси. Изучаются варианты получения неразъемных соединений одно- и разнородных материалов с помощью ЭЛ воздействия, разрабатываются методы инженерии поверхности. Имеющееся в институте ЭЛ оборудование позволяет проводить обработку образцов и изделий с размерами от нескольких миллиметров до 2-3 метров и массой до нескольких тонн. Максимальная мощность электронного луча – 30 кВт. Подготовлен высококвалифицированный научно-технический персонал.

Получение неразъемных соединений электронно-лучевой сваркой. ЭЛС обладает широкими технологическими возможностями, позволяя соединять за один проход металлы и сплавы толщиной от 0,1 мм до десятков и сотен миллиметров. Плотность энергии в луче (до 10^9 Вт/см²) превышает плотность энергии сварочной дуги на два–пять порядков. Такая концентрация энергии, достигаемая в сварочных электронных пушках, делает возможным сварку с недостижимым для электродуговых методов отношением глубины к ширине проплавления (до 50 : 1). Узкий шов, параллельность его границ и малая протяженность зоны термического влияния обуславливают незначительные линейные и угловые деформации свариваемых изделий.

В институте исследовано влияние основных параметров ЭЛ воздействия, изучены закономерности и оптимизированы условия формирования ванны

расплава в сталях, сплавах меди и алюминия, чистого ниобия при воздействии в режимах сварки в широком диапазоне геометрических параметров - от листовых материалов толщиной порядка миллиметра до глубокого проплавления массивных изделий. Размеры, конфигурация и качество формирования швов при ЭЛС определяются устойчивостью, формой и размерами парового канала сварочной ванны, которые, в свою очередь, зависят от мощности, эффективного радиуса, угла сходимости луча, положения фокального пятна луча, пространственного положения стыка, теплофизических свойств металла и скорости сварки.



Применительно к характерным изделиям машиностроения Беларуси (шестерням и валам) решена задача получения сварного шва глубиной 5 - 35 мм (рис. 1). Установлено существенное влияние на глубину ванны положения активной зоны электронного луча относительно поверхности заготовки, для получения максимального проплавления положение плоскости фокального пятна должно соответствовать 0,5-0,75 этой глубины.

Рисунок 1 – Поперечное сечение шва глубиной 32 мм, выполненного ЭЛС сталей 25ХГТ и 40Х

Совместно с МТЗ, МАЗ, БелАЗ, МЗШ, Амкодор, БЗА, Станко-Гомель, БЭРН разрабатываются конструкции новых узлов, в том числе из разноименных и ограниченно сваривающихся материалов. Изготовление валов и шестерен станков, задних мостов, узлов коробок передач и т.д. из сталей по разработанным технологическим процессам снижает материалоемкость узлов до 50 %. Однако масштабы применения ЭЛС в стране должны быть более существенными.

Получение неразъемных соединений ЭЛ пайкой. Вместо шлифования высокотвердых материалов может успешно применяться качественная лезвийная обработка инструментом из сверхтвердых материалов (СТМ). Выполнен спектр исследований по проведению ЭЛ пайки СТМ к основе из сталей или твердых сплавов. Основным условием пайки кубического нитрида бора (КНБ) и поликристаллического алмаза (ПКА) является смачивание материалов сплавом, для чего в его состав должен быть введен адгезионно-активный элемент, например Ti.

При оптимизации пайки СТМ, исходя из получения требуемой прочности соединения и необходимых эксплуатационных характеристик инструмента, показана возможность реализации процесса за 1-2 мин при минимальном энерго-

вложении (10-20 кДж) в инструмент. Пайка с нагревом лучом небольшой интенсивности дает возможность применения адгезионно-активных припоев на основе Cu и Ag при содержании до 5 мас. % Ti, обеспечивающих смачивание соединяемых материалов, снижает опасность графитизации СТМ и обеспечивает его высокопрочное соединение с основой.

Разработаны новые конструкции инструмента с повышенной прочностью удержания СТМ, что существенно улучшает производительность и качество обработки деталей. Инструмент с КНБ наиболее эффективен для обработки сталей и чугунов с твердостью до 60 - 70 HRC, инструмент с ПКА - сплавов цветных металлов (в частности Al - 12-22 % Si), а также керамик. По сравнению с твердосплавным инструментом стойкость инструмента из СТМ больше до 50 раз (при точении сплава AL25). Изделия после лезвийной обработки инструментом, оснащенным СТМ, имеют шероховатость поверхности до 0,05 - 0,63 мкм, сравнимую с поверхностью после шлифовки. Инструмент с элементами из ПКА использован для расточки отверстий под пальцы в поршнях из сплавов Al-Si, для обработки точением деталей пар трения (из силицированных графитов СГ-Т и СГ-П и карбида кремния SiC) насосов для перекачивания агрессивных жидкостей.

Поверхностное упрочнение в режиме закалки. Выполнено теоретическое и экспериментальное моделирование процессов скоростного ЭЛ нагрева поверхности изделий из инструментальных сталей, чугунов и титановых сплавов. Особенностью ЭЛ закалки является применение плотности энергии 10^2 - 10^4 Вт/см², что обеспечивает высокие скорости нагрева (10^3 - 10^5 °С/с) и самоохлаждения материала. Такая обработка в режиме закалки из твердого состояния приводит к дифференцированному упрочнению материала на глубину 0,1-2 мм, формированию в поверхностном слое новых структурных состояний. Структура и свойства, глубина закалки, качество поверхности изделия зависят от технологических параметров нагрева и исходного структурного состояния материала. Степень упрочнения составляет 3,6-3,7 для исходно отожженных сталей и 1,5-1,7 для предварительно объемно закаленных. Твердость конструкционных, инструментальных и подшипниковых сталей достигает HRC 65-68, микротвердость - 10 - 11 ГПа.

Комбинированные и совмещенные методы инженерии поверхности связаны с изменением химического состава материала – наплавкой на основу износо-, коррозионностойкого или антифрикционного материала, нанесением покрытий, позволяющих значительно повысить эксплуатационные характеристики деталей. Применение комбинированного ЭЛ воздействия обеспечивает получение комплекса характеристик упрочненного изделия, которые невозможно получить с применением традиционных методов упрочнения. Проведены приоритетные исследования по теоретическому и экспериментальному моделированию методов нанесения многофункциональных слоев на основу из сталей и титановых сплавов, изучению структурно-фазовых превращений в них. Используются различные методы предварительного осаждения покрытий (электродуговых, ХТО, газотермических, электролитических, детонационных и др.), в ис-

ходном состоянии им присущи высокая пористость, малая прочность самого слоя, его адгезия к основе и износостойкость. ЭЛ обработка таких покрытий приводит к благоприятным структурным и фазовым превращениям в покрытии и в основе, изменениям в свойствах осажденных слоев, релаксационным процессам в дефектном материале покрытия, формированию переходной диффузионной зоны, повышению прочности сцепления и плотности покрытий, износостойкости и других характеристик.

Перспективные исследования по применению ЭЛ обработки. Современные ЭЛ технологии используются в самых разнообразных областях, начиная от ЭЛ нанолитографии (с разрешением порядка 10 нм) и формирования нанокристаллических материалов (одно- и многофазных, одно- и многослойных покрытий, пористых в форме тонких, порядка $\cdot 10^{-2}$ мм, и толстых, до 10 мм, полуфабрикатов в виде фольги, ленты, листа, порошка) до радиационной обработки огромных объемов твердых и жидких материалов.

Опыт по формированию деталей путем последовательного ЭЛ нагрева и расплавления добавляемых материалов является основой для создания новых методов передового производства (аддитивных технологий), активно изучаемых во всем мире. В Беларуси этому направлению уделяется определенное внимание.

Интенсивно распространяется применение потока электронов в медицинской практике для стерилизации медицинских изделий, в карантинных службах для борьбы с опасными инфекционными болезнями, сельскохозяйственной и природоохранной практике для очистки сточных вод, навозохранилищ, обеззараживания загрязненных территорий, выбросных газов предприятий, уничтожения патогенных паразитов и микроорганизмов в свежем и замороженном мясе.

Заключение. В Республике Беларусь заложены научно-технологические основы промышленного применения электронно-лучевых технологий. Разрабатываются методы, относящиеся к 5-му и 6-му технологическим укладам.

В ФТИ НАН Беларуси на основании теоретических и экспериментальных исследований установлены закономерности влияния параметров ЭЛ воздействия на характер температурного поля в материале и осуществляемые при этом технологические процессы. Управление процессами реализуется благодаря формированию требуемого температурного поля в заготовке путем варьирования параметрами потока электронов.

ЭЛ технологии в Беларуси можно использовать с большой эффективностью практически на всех предприятиях машиностроительного профиля, в медицинской, сельскохозяйственной и природоохранной практике, карантинных службах. Широкое внедрение является важным фактором повышения конкурентоспособности продукции на внешних рынках. Однако этим направлениям уделяется недостаточно внимания.

УДК 539.3+621.039.5

О НЕЛИНЕЙНОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ ТВЕРДЫХ ТЕЛ В УСЛОВИЯХ НЕРАВНОМЕРНОГО НАГРЕВА И ОБЛУЧЕНИЯ

Ширвель П.И., Чигарев А.В.

Белорусский национальный технический университет,
Минск, Республика Беларусь

По классификации, предложенной В.В. Новожиловым задачи, рассматриваемые в механике деформируемых тел можно условно разделить на четыре типа: 1) линейные физически и геометрически; 2) линейные физически, геометрически нелинейные; 3) нелинейные физически, геометрически линейные; 4) нелинейные и физически, и геометрически [1]. В настоящее время развитие МДТТ идет как по пути усиленной детализации простых вариантов (тип 1, 2), так и по пути решения сложных (тип 3) и очень сложных «дважды» и «трижды» нелинейных систем, когда в процессе деформирования значительно изменяется исходная расчетная схема.

В настоящей работе на основе классического термомеханического подхода предлагается постановка и методика численного решения задачи о физически и геометрически нелинейном (конечном) деформировании твердых тел под действием силовых и терморadiационных нагрузок с учетом их взаимного влияния (в рамках гипотезы сплошности). Учитывалось, что размерные изменения, могут быть обусловлены в основном двумя причинами: ползучестью нагруженного образца, возрастающей под действием облучения и радиационным набуханием, проявляющимся в изменении линейных размеров ненагруженного образца в потоке частиц с большой энергией ($E > 0.1$ МэВ). Отметим, что рост ползучести и набухание могут вывести из строя конструктивные элементы агрегатов, работающих при высоких температурах и интенсивном облучении, так как деформации такого рода с течением времени могут стать недопустимо большими. Таким образом, допускаемые напряжения в подобных деталях определяются не пределом текучести и прочности, а допускаемыми деформациями для заданного срока службы, которые зависят от условий нормальной эксплуатации. В этом состоит существенное отличие расчета конструктивных элементов, работающих при высокой и нормальной температурах в условиях радиационного облучения.

Поведение облученных тел существенно отличается от поведения необлученных. В некоторых случаях перемещения точек деформируемого твердого тела могут быть достаточно большими, например, при аварийных ситуациях в условиях ядерного реактора или при значительном радиационном набухании конструкционных материалов (15-23%). Конечные перемещения приводят к большим деформациям, при исследовании которых необходимо надлежащим образом учесть как ползучесть, так и радиационное набухание. Таким образом, в геометрических уравнениях нелинейные члены, содержащие квадраты и произведения производных:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i} + u_{k,i}u_{k,j}), \quad u_{i,j} = \frac{\partial u_i}{\partial x_j}, \quad i, j, k = 1, 2, 3,$$

которые могут сыграть важную роль для расчетов кинетики напряженно-деформированного состояния и прогнозирования ресурса ответственных элементов конструкций, эксплуатируемых в экстремальных условиях нагружения.

В литературе отсутствуют публикации, в которых были бы предложены варианты моделей конечного терморadiационноупругого деформирования. Исключения составляют лишь монографии Ю.В. Лихачева [2] и И.С. Куликова [3,4], в которых сделаны первые шаги в этом направлении. В [5] были рассмотрены модели «второго порядка точности» для цилиндрических тел, когда перемещения «умеренные», а деформации по-прежнему малы (данное предположение использовалось и для учета термического расширения, радиационного распухания, ползучести). Численными экспериментами установлено, что при воздействии на неоднородно нагретый и облученный материал даже под действием только гидростатического давления, возможно появление сдвиговых деформаций, причем в начально необлученных материалах при таком воздействии сдвиговые деформации не возникали. Расчеты показали, что поведение облученных и необлученных материалов под воздействием температурного поля различно: в однородном поле в нестесненном необлученном теле возникают только объемные деформации, а в облученном теле к объемным деформациям добавляются сдвиговые. В случае нагревания тел при отсутствии деформаций в них возникают термические напряжения, которые в изотропных телах являются гидростатическими, а при неравномерном облучении могут содержать шаровую и девиаторную составляющие. Механические свойства твердых тел также зависят от температуры и облучения, причем эта зависимость может быть и нелинейной. Проявление описанных нелинейных эффектов в изотропных цилиндрических телах усиливается с ростом деформаций, поэтому актуальной является дальнейшая разработка моделей конечного деформирования облучаемых твердых тел, позволяющих описать эти явления.

Проведенный анализ механико-математической модели в первом приближении (на примере осесимметричного терморadiационного деформирования изотропного полого цилиндра), показал, что до уровня деформаций 3,6% результаты расчетов по геометрически линейным и геометрически нелинейным соотношениям практически совпадают. При деформациях порядка 17% выявлены существенные (45-67%) различия между линейными и нелинейными решениями. Указанный подход позволил проследить за реальным изменением формы твердого тела в процессе квазистатического деформирования.

Планируется разработать двух- и трехмерные механико-математические модели, которые вместе с программными средствами их численной реализации могут быть использованы для исследования закономерностей конечного деформирования и разрушения материалов в терморadiационных потоках, а также для расчетов кинетики напряженно-деформированного состояния ответственных элементов конструкций, эксплуатируемых в экстремальных условиях нагружения и уточнения прогнозирования ресурса всей конструкции в целом.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Новожилов, В.В. Основы нелинейной теории упругости / В.В. Новожилов: Едиториал УРСС, 2003. - Москва - 214 с.: ил. — ISBN 5-354-00302-4.

2. Лихачев, Ю. И. Прочность тепловыделяющих элементов ядерных реакторов / Ю.И. Лихачев, В.Я. Пупко. - М.: АТОМИЗДАТ, 1975. - 280 с.
3. Куликов, И. С. Прочность тепловыделяющих элементов быстрых газоохлаждаемых реакторов / Под ред. В. Б. Нестеренко. - Минск: Наука и техника, 1984. - 103с.
4. Куликов, И. С. Прочность элементов конструкций при облучении / И.С. Куликов, В.Б. Нестеренко, Б.Е. Тверковкин. - Минск: Навука і тэхніка, 1990. - 143с.
5. Ширвель, П.И. Прочность неравномерно нагретых цилиндрических тел в условиях ползучести и радиационного облучения / П.И. Ширвель, А.В. Чигарев, И.С. Куликов. - Минск: Белорусский национальный технический университет, 2014. - 252 с.: ил. — ISBN 978-985-550-661-5.

УДК 621.785.5

ПОВЫШЕНИЕ СВОЙСТВ ТЕРМОДИФФУЗИОННЫХ СЛОЕВ ОСАЖДЕНИЕМ ТВЕРДЫХ ПЛЕНОК TiAlN

Константинов В.М., Ковальчук А.В.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Технологии получения термодиффузионных слоев на сталях и сплавах железа достигли значительного прогресса и позволяют проводить насыщение практически любыми элементами, а толщины получаемых диффузионных слоев охватывают не менее четырех порядков значений [1]. Традиционно применяемые методы химико-термической обработки (ХТО) являются эффективными, но зачастую малопродуктивными процессами поверхностного упрочнения. Большая длительность технологического цикла определяется относительно низкой диффузионной подвижностью атомов насыщающего элемента, особенно при низкотемпературных процессах (азотирование, карбонитрация). Вместе с этим уровень прочностных свойств диффузионных слоев в условиях повышающихся требований к эффективности поверхностного упрочнения, заключающейся в уровне получаемых свойств и ресурсоемкости применяемых технологий, а также тяжелые условия работы упрочняемых деталей, зачастую является недостаточным.

Однако потенциал практического использования диффузионных слоев не реализован полностью. Так, перспективным представляется совершенствование методов ХТО с привнесением операций вакуумной ионно-плазменной обработки для получения на поверхности твердых пленок, которые могут формировать с диффузионным слоем двухслойную систему, обладающую свойствами, недостижимыми в отдельности диффузионным слоем и твердой пленкой [2].

В данной работе были получены опытные образцы износостойких двухслойных систем типа «термодиффузионный слой – покрытие TiAlN». Они представляли собой структуру модифицированной в результате карбонитрации, ИПА, однофазного и двухфазного борирования в порошковой среде стальной подложки и высокотвердого тонкого покрытия TiAlN на поверхности, полученного путем контролируемого магнетронного нанесения.

Карбонитрацию проводили при 550...600 °С, 7 ч в порошковой среде в контейнере, герметизируемом плавким затвором в камерной электропечи. ИПА

осуществляли на установке AP 63, производства ФТИ НАН Беларуси. Установленные режимы ионно-плазменного азотирования: длительность – 6 ч; напряжение разряда – 800 В; плотность тока – 21 мА/см²; состав смеси газов – Н₂ + N₂; давление смеси – 600 МПа; температура – 520...540 °С; мощность разряда – до 80 кВт. Для проведения процесса диффузионного борирования использовали оригинальную порошковую смесь с высокой насыщающей способностью «besto-bor» [34]. Насыщение проводили при 950 °С, 1 ч с предварительной изотермической выдержкой 750 °С, 1 ч в контейнерах, герметизируемых плавким затвором.

Покрyтия TiAlN наносили в НИИ ПФП им. А.Н. Севченко БГУ под руководством зав. лаборатории элионики чл. корр. НАН Беларуси, д. ф.-м. наук, профессора Ф.Ф. Комарова. Для формирования покрытий была использована вакуумная установка магнетронного распыления УРМ 327. В процессе нанесения образцы нагревались до T=250°С. Толщина покрытий TiAlN на всех образцах составила 1 мкм.

Результаты оценки интегральной микротвердости пленок TiAlN на неупрочненных подложках и двухслойных систем «термодиффузионный слой – покрытие TiAlN» при различных нагрузках на индентор (таблица 1) показали, что микротвердость двухслойных систем существенно выше, а увеличение микротвердости с уменьшением прикладываемой нагрузки больше, чем для покрытий TiAlN на неупрочненных подложках.

Это указывает на то, что покрытие TiAlN не продавливается, а с учетом своей толщины привносит значительный вклад в результирующие свойства поверхности с диффузионным слоем. Это подтверждается значениями микротвердости при нагрузках 0,49 Н и 0,98 Н, которые не характерны для использованных материалов подложек и полученных на них слоев в результате ХТО.

Установлено, что износостойкость двухслойных систем «термодиффузионный слой – покрытие TiAlN» выше, чем покрытий TiAlN на неупрочненных подложках. Так, по сравнению с покрытиями TiAlN на неупрочненных подложках микротвердость и износостойкость двухслойных покрытий, получаемых в результате предварительной карбонитрации и последующего нанесения TiAlN выше в 3,4...3,5 и 2,0...2,2 раза; предварительного ИПА – 3,3...4,1 и 1,8...2,1 раза; предварительного однофазного борирования – 9,4...11,5 и 2,6...2,9 раза; предварительного двухфазного борирования – 11,5...13,2 и 3,3...3,4 раза соответственно [3].

Это можно объяснить тем, что предварительное упрочнение в результате карбонитрации, ИПА или борирования увеличивает время до появления остаточной деформации в подложке и снижает градиент жесткости и твердости между подложкой и покрытием. Образующиеся в результате термодиффузионного насыщения остаточные напряжения сжатия в поверхностном слое подложки увеличивают время до появления усталостных трещин.

Таблица 1 – Свойства образцов после различных видов упрочнения

Материал подложки + вид обработки	Микротвердость (МПа) при нагрузке (Н)	Сравнительная износостойкость,
-----------------------------------	---------------------------------------	--------------------------------

	0,49	0,196	0,098	отн. ед.
Армко-железо	1750	1950	2110	1,0
Армко-железо + карбонитрация	3940	5240	7390	2,0
Армко-железо + однофазное борирование	12800	15300	18860	2,9
Армко-железо + двухфазное борирование	15300	18540	24330	3,3
38Х2МЮА	2120	2390	2810	1,3
38Х2МЮА + ИПА	8740	8900	9350	2,4
Х12М	3610	4070	4400	1,4
Х12М + ИПА	12820	13900	14260	2,8
У8А	1920	2380	2710	1,4
У8А + однофазное борирование	15620	19860	25600	3,7
У8А + двухфазное борирование	18900	24930	34060	4,6
9ХС	1920	2300	2680	1,4
9ХС + однофазное борирование	15480	20430	26750	4,1
9ХС + двухфазное борирование	17550	25750	35400	4,8
12Х18Н10Т	1870	2120	2440	1,1
12Х18Н10Т + карбонитрация	5650	6460	8470	2,2

В результате карбонитрации формируются остаточные напряжения сжатия величиной около 400...800 МПа, ИПА – 600...800 МПа, борирования – 800...1000 МПа [4]. В то же время, при наступлении начала последовательного разрушения покрытия более жесткий термодиффузионный слой накапливает меньше остаточной деформации и тормозит развития очага разрушения, а при полном разрушении покрытия под контртелом работает дольше неупрочненной подложки.

Полученные экспериментальные результаты и анализ известных подходов к материаловедению композитов позволяют полагать, что получаемые в результате ХТО и последующего вакуумного нанесения двухслойные системы «термодиффузионный слой – покрытие TiAlN» представляют собой новые микрокомпозиционные материалы, так как в этой системе выполняются все современные условия, по которым происходит их определение, а именно:

- рассматриваемая система состоит из двух разнородных по составу, структуре и свойствам материалов, имеющих границу раздела;
- термодиффузионный слой и вакуумное покрытие образуют оригинальную систему своим объемным сочетанием;
- обсуждаемые двухслойные покрытия характеризуются свойствами, не достижимыми в отдельности материалами вакуумного покрытия и термодиффузионно упрочненной стальной подложки.

Экспериментально показано, что упрочнение сталей подложки в результате карбонитрации, борирования или карбидизации в порошковой среде также позволяет повысить эффективность пленок TiAlN, заключающуюся в существенном повышении их несущей способности, повышении микроиндентационного отклика, а также износостойкости поверхности с пленкой TiAlN.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Константинов, В. М. Инновационные технологии поверхностной обработки стальных изделий / В. М. Константинов, В. Г. Дашкевич, Г. В. Стасевич, А. В. Ковальчук, В. Г. Щербаков, Д. В. Гегеня // "Современные проблемы освоения новой техники, технологий, организации технического сервиса в АПК" : материалы Междунар. науч.-практ. конф. Минск, 9 июня 2016 г. / М-во с. х. и прод. Респ. Беларусь, РО «Белагросервис», УО «Белорус. гос. аграр. техн. ун-т»; редкол.: Н.К. Лисай [и др.]. – Минск: БГАТУ, 2016. – С. 177–180.

2. Komarov, F.F. The effect of steel substrate pre-hardening on structural, mechanical, and tribological properties of magnetron sputtered TiN and TiAlN coatings / F.F Komarov, V.M. Konstantinov, A.V. Kovalchuk, S.V. Konstantinov, H.A. Tkachenko // *Wear.* – 2016. – Vol. 352-353. – P. 92–101.

3. Константинов, В.М. Свойства двухслойных износостойких покрытий «термодиффузионный слой – TiAlN» на сталях / В.М. Константинов, А.В. Ковальчук, В.Г. Дашкевич // Журнал физики и инженерии поверхности, 2016. – Т. 1 – № 2. – С. 213-224.

4. Лахтин Ю.М. Материаловедение. – М.: Машиностроение, 1990. – 528 с.

УДК 621.793

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ТЕРМОДИФфуЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ И СОДЕРЖАНИЯ ЛЕГИРУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ НА СВОЙСТВА ОКСИДА АЛЮМИНИЯ

Девойно О.Г., Карданолова М.А., Яцкевич О.К.

Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь

Керамические покрытия на основе оксида алюминия в зависимости от условий протекания процесса могут состоять из различных фаз, имеющих значительные отличия в физико-механических свойствах: метастабильной фазы γ - Al_2O_3 , высоко-температурной фазы α - Al_2O_3 , нескольких промежуточных фаз β , δ , θ [1, 2]. Условия протекания фазовых переходов низкотемпературной модификации (γ - Al_2O_3) в высокотемпературную (α - Al_2O_3) с учетом наличия всех промежуточных состояний и итоговое количественное соотношение фаз в полученных покрытиях непостоянны и в различных литературных источниках носят противоречивый характер. Однако, установлено, что решающее влияние на процесс перехода одной фазы в другую оказывает технология напыления, технологические параметры процесса, а также особенности строения и свойств порошка и его поведения в плазменной струе.

Поэтому изменить фазовый состав и управлять полиморфными превращениями в плазменных керамических покрытиях на основе оксида алюминия можно не только за счет изменения условий напыления, но и путем оптимизации исходного состава порошка, используемого при получении покрытия. Кроме того, введение дополнительных элементов позволяет не только изменить фазовый состав оксида алюминия, но и улучшить эксплуатационные свойства полученных покрытий, повысив прочность сцепления с основой и износостойкость при снижении пористости.

Порошки для плазменного напыления покрытий на основе оксида алюминия были получены в данной работе методом термодиффузионной обработки, направленной на активацию поверхности и введение определенного количества легирующего элемента. Выбор легирующих элементов для термодиффузионной

обработки проводили на основе анализа влияния различных типов соединений и простых металлов и неметаллов на эксплуатационные характеристики покрытий.

С учетом дополнительного повышения прочности сцепления с основой, износостойкости, снижения пористости, а также увеличения рабочей температуры покрытий на основе оксида алюминия выбор остановили на молибдене (Mo). Данный металл в чистом виде широко используется для нанесения подслоев под керамические покрытия, обеспечивая повышение адгезионной составляющей со стальной основой за счет образования химической связи и уменьшения влияния остаточных напряжений, способных вызвать отслаивание сформированного слоя [3]. В работе [4] показано, что для спеченных композиционных материалов Al_2O_3+Mo присутствие металлической фазы Mo позволило уменьшить коэффициент трения.

Еще одним существенным недостатком керамических покрытий на основе оксида алюминия является наличие высокой пористости, особенно для покрытий толщиной более 1мм [3]. Управлять размером пор и их количеством в сформированном покрытии можно путем изменения технологических режимов напыления, либо путем введения в состав покрытия на основе оксида алюминия кислых оксидов, например, оксида бора (B_2O_3), используемого при изготовлении изделий из спеченной керамики, обладающей контролируемой пористостью. Кроме того, оксид бора является отличной высокотемпературной смазкой и применяется в составе композиционной керамики для колец подшипников, работающих при температурах свыше $1000\text{ }^{\circ}C$ [5]. Однако, использование боридов как самостоятельного материала жаростойкого покрытия затруднительно ввиду их низкой окислительной устойчивости. Поэтому, как правило, в композитных покрытиях как источник оксида бора [1] используются активный бор. Таким образом, в качестве второго легирующего элемента для модифицирования оксида алюминия был выбран бор.

Методика исследований. Модифицирование керамического порошка проводили путем изотермической выдержки во вращающемся контейнере шихты, содержащей дополнительно модифицирующую добавку и активатор. Степень заполнения объема контейнера 50%, соотношение грануляций исходного порошка и легирующей добавки находилось в пределах (3÷5):1. Контейнер располагали горизонтально в рабочей зоне футерованной печи и приводили во вращение электродвигателем через редуктор. Время изотермической выдержки варьировалось в пределах 0,5-6 часа при вращении контейнера с частотой 40-50 мин^{-1} при температуре 600-1200 $^{\circ}C$. Исходным порошком для термодиффузионной обработки являлся порошок оксида алюминия марки – Г-0 по ГОСТ 30558-98 с размером частиц 60-80 мкм. Порошок молибдена соответствует ТУ 48-19-316-80 с размером частиц 20-40 мкм. Бор взят в аморфном виде марки Б-99А по ТУ 1-92-154-90. С целью активации процесса в состав насыщающей смеси вводили активатор - соединение NH_4Cl .

Обсуждение результатов. Частицы порошков, прошедшие термодиффузионную обработку в присутствии молибдена, представляют собой агломерат, со-

стоящий из крупной частицы оксида алюминия и закрепленных на ней мелких металлических частиц. Такое строение частицы в процессе плазменного напыления создаст условия для интенсивного теплоотвода с поверхности, что позволит сохранить мелкие частицы молибдена от полного испарения до момента соударения с подложкой. Частицы молибдена, введенные в исходную смесь, благодаря постоянному вращению контейнера равномерно распределяются по всей массе порошка Al_2O_3 ; в свою очередь длительная изотермическая выдержка при температурах более $600^\circ C$ способствует закреплению металлических частиц на керамической основе с образованием конгломерированной частицы (рисунок 1 (а)). Химическое взаимодействие молибдена с оксидом алюминия не выявлено, диффузионный слой не образуется. Известно, что молибден при нагреве до температуры $400-600^\circ C$ в окислительной атмосфере сгорает с образованием MoO_3 . Установлено, что окисление в насыщающей смеси в процессе термодиффузионной модификации происходит, однако, в незначительном количестве – до 2%. Большую часть объема контейнера занимает порошковая смесь, при этом контейнер герметизируется, что предотвращает попадание воздуха. Кроме того, дополнительно введенный активатор NH_4Cl при нагреве разлагается и создает избыточное давление в контейнере, замедляя процесс окисления молибдена.

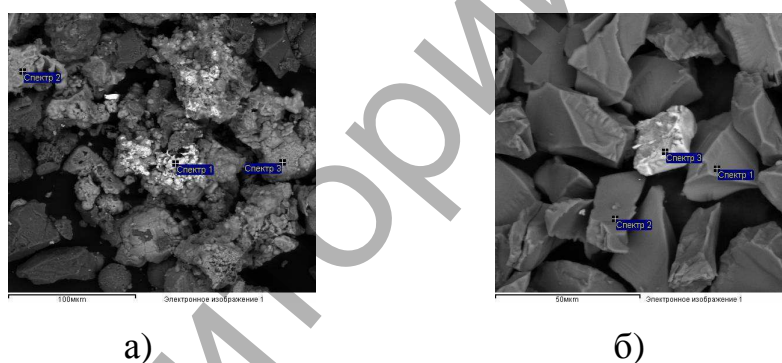


Рисунок 1 – Микроструктура порошков Al_2O_3 после термо-механической обработки в присутствии молибдена (а) и бора (б)

Термодиффузионная обработка при температуре $1000^\circ C$ в присутствии бора способствует разрушению агломератов по внутренним границам зерен и формированию плакированной частицы (рисунок 1 (б)). Бор распределён по поверхности частицы равномерно, не вступает в химическое взаимодействие с оксидом алюминия. Таким образом, различие частиц порошка Al_2O_3-B и Al_2O_3-Mo по форме и степени дисперсности объясняется различной природой взаимодействия модифицирующих добавок.

К технологическим параметрам процесса модификации, влияющим на качество получаемых порошков, относятся степень заполнения контейнера порошковой смесью, частота вращения контейнера, время изотермической выдержки, исходная грануляция порошков. Характер и степень влияния режимов на технологические свойства порошков были определены в ходе проведенных исследований.

Установлено, что наибольшее влияние из всех параметров термодиффузионной модификации на технологические свойства порошков и их фазовый состав оказывает температура в контейнере. На рисунке 2 представлены результаты измерения удельной поверхности порошков методом газовой адсорбции с использованием анализатора удельной поверхности SA3100 (Coulter Corporation) после термодиффузионной обработки, проходящей при температурах от 20 до 1200 °С.

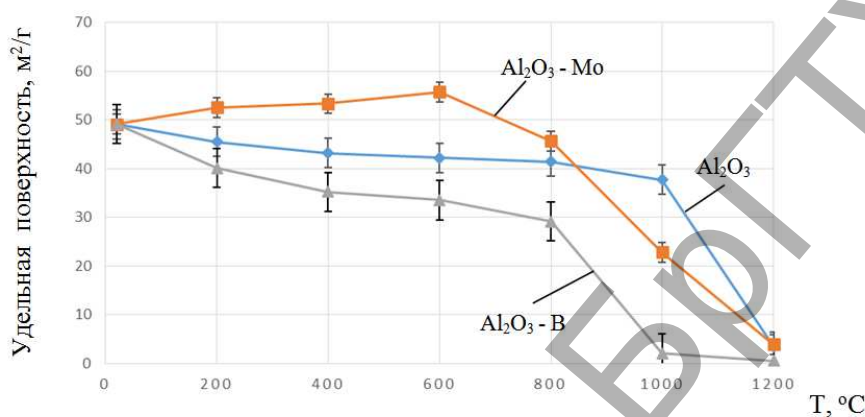


Рисунок 2 - Зависимость удельной поверхности порошков от температуры термодиффузионной обработки

Величина удельной поверхности наряду с текучестью позволяет оценить морфологию частиц порошка и прогнозировать поведение порошковых материалов в плазменной струе. Известно, что чем ближе форма частицы к форме правильной сферы, тем более высокую текучесть имеет композиционный порошок, что способствует равномерной подаче из питателя к плазматрону.

Наименьшее значение удельной поверхности 0,52 м²/г соответствует порошку, модифицированному бором. Порошок Al₂O₃, модифицированный молибденом, характеризуется удельной поверхностью –3,9 м²/г. Для обеих композиций резкое уменьшение удельной поверхности начинается при температуре 800°С, в отличие от порошка без легирующих элементов, у которого удельная поверхность при данной температуре составляет 40-45 м²/г. Таким образом, в зависимости от состава и условий получения модифицированных термодиффузионной обработкой порошков установлено, что наибольшей текучестью обладает порошок Al₂O₃-B, характеризующийся также и наименьшей удельной поверхностью.

Кроме того, термодиффузионная обработка при различных температурах приводит к изменению соотношения фаз оксида алюминия. Выдержка контейнера при температуре 600°С приводит к сокращению количества фаз до трех основных типов α, γ, δ, а уже при температуре термодиффузионной обработки 800°С нестабильные фазы γ и δ переходят в θ фазу с моноклинной кристаллической решеткой. При температуре 1200°С все метастабильные промежуточные фазы необратимо переходят в стабильную высокотемпературную α фазу.

Вывод. Плазменные покрытия в значительной мере наследуют фазовый состав и структуру порошков на основе оксида алюминия, модифицированного

термодиффузионной обработкой. Поэтому фазовый состав порошка должен содержать наибольшее количество α - Al_2O_3 . Водимые добавки молибден и бор не должны окисляться с образованием летучих соединений, а закрепляться на поверхности керамической частицы. При этом технологические характеристики порошков должны обеспечивать стабильность температурно-временных параметров при прохождении частиц через плазменную струю. Наибольшее влияние на технологические характеристики порошковых материалов для напыления на основе оксида алюминия оказывают содержание легирующего элемента и температура во вращающемся контейнере в процессе термодиффузионной обработки.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Соколова Т. В. и др. Комплексное исследование напыленной окиси алюминия с некоторыми заданными физико-химическими характеристиками // Неорганич. и органич. покрытия, Ленинград, Наука. – 1975. – С. 128-135.
2. Погребняк А. Д. и др. Получение и исследование структуры и свойств плазменно-детонационных покрытий из Al_2O_3 // Письма в ЖТФ. – 2000. – Т. 26. – №. 21. – С. 53-60.
3. Самсонов Г.В., Эпик А.П. Тугоплавкие покрытия. - 2-е изд. пер. и доп. - М.: Металлургия, 1973. - 400 с.
4. G. de Portu G. et al. Wear behaviour of Al_2O_3 -Mo and Al_2O_3 -Nb composites // Wear.-2007.- Т. 262. – №. 11. – С. 1346-1352.
5. Tabuchi H., Itoh T. Electrofusion method of producing boron aluminum oxide refractory : пат. 4226629 США. – 1980.

УДК 544.22 + 544.08

ГАЗОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ КОМПОЗИЦИЙ ОКСИДА ВОЛЬФРАМА (WO_3) И ОКСИДОВ КОБАЛЬТА (CoO , Co_3O_4)

Гайдук Ю.С., Ломоносов В.А., Савицкий А.А.

Белорусский Государственный Университет,
Минск, Республика Беларусь

Полупроводниковые резистивные датчики на основе SnO_2 , In_2O_3 , WO_3 , ZnO и др. оксидов широко применяются для обнаружения и определения концентрации различных газов. Целью данной работы было изучение структурных и газочувствительных свойств оксида вольфрама (WO_3), полученного золь-гель методом, и его композиций с оксидами кобальта Co_3O_4 и CoO . Исследований по газовой чувствительности указанных систем в литературе не обнаружено.

Методика эксперимента. Гель вольфрамовой кислоты получен из 1,23 М р-ра вольфрамата натрия и 12 М р-ра азотной кислоты. $\text{Na}_2\text{WO}_4 \times 2\text{H}_2\text{O}$ по каплям добавляли к раствору HNO_3 . При термическом разложении геля образуется нанокристаллический триоксид вольфрама.

Оксид кобальта Co_3O_4 получали осаждением 9,24 М р-ром аммиака из 2,3 М р-ра $\text{CoSO}_4 \times 7 \text{H}_2\text{O}$. Отжиг высушенного при комнатной температуре ксерогеля при 600 °С (2 ч) приводил к получению нанокристаллического Co_3O_4 .

Оксид кобальта CoO получали термическим разложением полученного по вышеописанной методике Co_3O_4 при 950 °С (2 ч).

Электрическое сопротивление образцов (таблеток) оксида вольфрама и композиции оксида вольфрама с CoO (1 % мас.) и Co_3O_4 (1, 3, 5, 15, 25 % мас.) в интервале 100–250 °С измеряли двухзондовым методом в корундовой ячейке, помещенной в трубчатую печь, подключенную к терморегулятору. Образцы в виде таблеток (диаметр 10 мм, толщина 3,5 мм, масса 0,7 – 0,8 г) прессовались из предварительно отожженных на воздухе порошков (400 °С, WO_3 , 2 ч, 600 °С, Co_3O_4 , 2 ч) с применением органического связующего (канифоль) на гидравлическом прессе (давление 150 кПа) и спекались на воздухе при 450 °С (2 ч). Для улучшения контакта на обе стороны образца наносилась серебряная паста.

Электрическое сопротивление в режиме нагрева и охлаждения измеряли при помощи цифрового ампервольтметра В7–40, температура контролировалась при помощи хромель-алюмелевой термопары, закрепленной непосредственно вблизи образца.

Газочувствительный отклик (S , %) определяли по формуле $S = (R_g - R_a) / R_a \times 100$ %, где R_a и R_g – сопротивление слоя на воздухе и при воздействии газовой смеси, соответственно. Газовоздушная смесь пропусклась через термостатированную измерительную ячейку в течение 10 минут со скоростью 2 л/ч, затем с той же скоростью подавался поток воздуха.

Рентгенографические исследования проводились при помощи дифрактометра ДРОН–3 ($\text{Co-K}\alpha_1$ –излучение). ОКР (размер кристаллитов) определяли по формуле Дебая–Шеррера.

Обсуждение результатов. По данным РФА, высушенный при 20 °С ксерогель, полученный по описанной выше методике, представляет собой гидратированную вольфрамовую кислоту ($\text{H}_2\text{WO}_4 \times \text{H}_2\text{O}$). В процессе последующей термообработки (2 ч) при 200 – 800 °С на рентгенограммах идентифицируются пики, относящиеся к моноклинной структуре WO_3 . Наблюдается рост ОКР от 60 – 70 нм при 200 °С до около 200 нм при 800 °С. По литературным данным из водных растворов вольфраматов можно получить как однофазный продукт, так и смесь различных модификаций WO_3 (ромбоэдрической, моноклинной и др. И использованные оксиды кобальта Co_3O_4 и CoO также представляли собой нанокристаллические порошки с ОКР 250 нм для Co_3O_4 и 40 – 50 нм для CoO .

Образцы для измерений получали смешением порошков оксидов, прессованием (1,5 МПа) и отжигом при 450 °С (2 ч). В процессе отжига при 450 – 600 °С химического взаимодействия между WO_3 и Co_3O_4 (а также и CoO) не наблюдается.

Наблюдаемое в обоих случаях увеличение чувствительности к СО уместно связывать с каталитической активностью в окислении СО, H_2 и углеводородов оксидами кобальта. Такая активность была обнаружена впервые японскими исследователями [1]. Авторы [1] связывали появление исключительно высокой чувствительности композиций SnO_2 – Co_3O_4 к СО и водороду с изменением окислительно-восстановительного состояния Co_3O_4 . Нами впервые показано, что CoO в составе гетерофазных композиций WO_3 – CoO также проявляет указанную активность, причём при более низких температурах, чем Co_3O_4 . Чувст-

вительность обеих композиций, $WO_3—Co_3O_4$ (1 % мас.) и $WO_3—CoO$ (1 % мас.) немонотонно увеличивается в интервале 150 – 240 °С. При этом чувствительность композиции $WO_3—CoO$ (1 % мас.) к СО уже при 170 °С становится сопоставимой с чувствительностью к СО композиции $WO_3—Co_3O_4$ (1 % мас.) при 242 °С. (см. рис. 2). Тем не менее, сравнивая газоадсорбционную активность CoO и Co_3O_4 , следует учитывать, помимо химической природы, размер частиц оксидов кобальта в матрице оксида вольфрама. Влияние данного фактора требует дополнительного исследования.

Образец оксида вольфрама проявляет n-тип отклика к газовым смесям, содержащим СО, образец оксида кобальта – р-тип отклика. Все смешанные образцы, с содержанием оксида кобальта от 1 до 25 % мас. показали n-тип отклика к указанной газовой смеси. Чувствительность композиции к СО заметно возрастает уже при небольшом содержании добавки Co_3O_4 и максимальна при содержании добавки 5 % мас. Однако и образец, содержащий 25 % мас. добавки демонстрирует более высокий отклик к СО, чем исходные оксиды вольфрама и кобальта (среди образцов чистых оксидов чувствительность образца оксида кобальта незначительно выше чувствительности образца оксида вольфрама).

На рисунке 1 представлены кривые чувствительности исследованных композиций к газоздушным смесям, содержащим 0,3 % СО в азоте и воздухе при 187,3 и 242,2 °С. Как следует из рисунка 1, при увеличении рабочей температуры от 187 °С до 243 °С величина сенсорного отклика увеличивается более чем вдвое.

С применением композиции $WO_3 + 5$ % мас. Co_3O_4 в ОАО «Минский НИИ радиоматериалов» изготовлены двухэлектродные газовые датчики. Датчики обладали существенно более высокой чувствительностью к СО и NO_2 по сравнению с датчиками, содержащими в составе чувствительного элемента (ЧЭ) чистый оксид вольфрама. ЧЭ из чистого WO_3 показал чувствительность к NO_2 и СО $S=1,5$ и 1,1 соответственно при токе нагрева 41 мА (236 °С). Датчики, содержащие добавку Co_3O_4 , показали более высокую чувствительность к СО и исключительно высокую чувствительность к 2 ppm NO_2 ($S \leq 560$ %), что позволяет детектировать данный газ на уровне значительно ниже ПДК. При этом время достижения максимального сигнала составляло около 200 с, рабочая температура не превышала 200 °С (ток нагрева 31 мА), а потребляемая мощность датчиков не превышала 85 мВт [2].

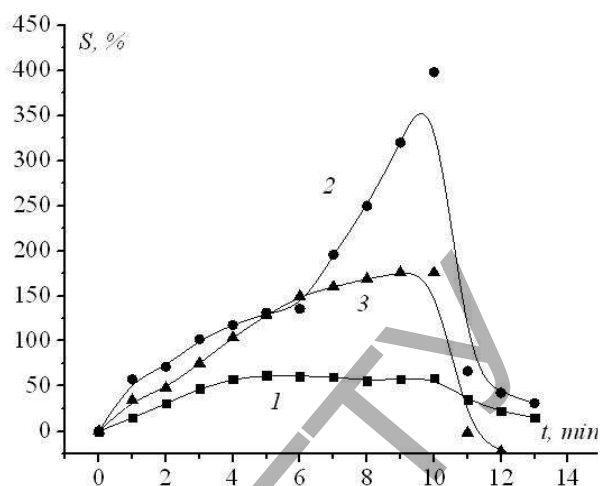
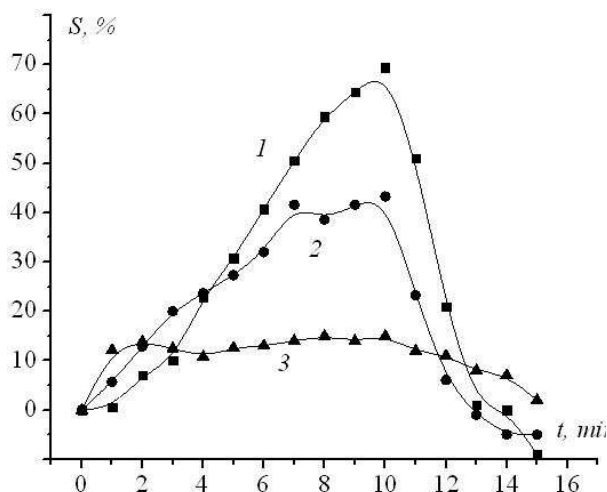


Рисунок 1 – Относительное изменение сопротивления образцов в газовых средах: а) 1 – $\text{WO}_3 + 1\%$ мас. CoO , CO/N_2 , 0,3 % об., 187,3 °С; 2 – $\text{WO}_3 + 1\%$ мас. CoO , $\text{CO}/\text{воздух}$, 0,3 %, 187,3 °С; 3 – $\text{WO}_3 + 1\%$ мас. Co_3O_4 , CO/N_2 , 0,3 % об., 186,3 °С; б) 1 – $\text{WO}_3 + 1\%$ мас. Co_3O_4 , $\text{CO}/\text{воздух}$, 0,3 % об., 242,2 °С; 2 – $\text{WO}_3 + 1\%$ мас. Co_3O_4 , CO/N_2 , 0,3 % об., 242,2 °С; 3 – $\text{WO}_3 + 1\%$ мас. CoO , CO/N_2 , 0,3 % об., 239,8 °С.

Выводы. Добавка к оксиду вольфрама оксидов кобальта CoO или Co_3O_4 приводит к заметному возрастанию газочувствительности по сравнению с чистым оксидом вольфрама, в частности, к 0,3 % об. CO в воздухе, 0,3 % об. CO в азоте, 0,98 % об. CH_4 в азоте. Данные материалы обладают хорошей адгезией к анодированному оксиду алюминия и пригодны для изготовления чувствительных полупроводниковых датчиков на различные газы с рабочей температурой менее 200 °С.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. N. Yamazoe. Toward innovations of gas sensor technology. Sensors and Actuators B. –2005. – Vol. 108. – P. 2–14.
2. Ю. С. Гайдук, В. А. Ломоносов, А. А. Савицкий. Физико-химические свойства оксидной композиции $\text{WO}_3\text{--Co}_3\text{O}_4$, полученной золь-гель методом. Известия НАНБ. Серия хим. наук. – 2015 г. – № 2. – С. 9–13.

УДК: 621.3.035.138

ВЛИЯНИЕ НАНОЧАСТИЦ НА ПРОЦЕСС ФОРМИРОВАНИЯ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ГАЛЬВАНИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ ЦИНКА

Лецик С.Д., Шупан П.И., Рыхлицкий Д.Г.

Гродненский государственный университет имени Янки Купалы,
Гродно, Республика Беларусь

Введение. Нанесение гальванических покрытий на поверхности деталей машин является эффективным способом управления их функциональными характеристиками. Такие технологии хорошо отработаны, но имеют существенный недостаток – экологическую вредность производства. Таким образом, вся-

кое улучшение эксплуатационных характеристик покрытий, позволяющее уменьшить их толщину представляется актуальным. Это дает возможность уменьшить время электроосаждения покрытия, увеличивая количество обработанных на одной загрузке гальванической ванны деталей. Применение дисперсных модификаторов в составе электролита позволяет получать композиционные электролитические покрытия, зачастую превосходящие базовые по показателям твердости, износостойкости, коррозионной стойкости и т.д. [1]. За счет этого возможно снижение толщины наносимого слоя. Высокодисперсные частицы могут оказывать различный модифицирующий эффект. В этом отношении перспективными являются наночастицы. Они легче зарастиваются в металлическую матрицу в процессе электроосаждения покрытия, эффективны при малых концентрациях в электролите. Добавление нанопорошков в электролит не всегда обеспечивает образование наносuspензии из-за слеживания частиц и образования устойчивых агрегатов микронного размерного уровня, что снижает эффективность применения модификатора, частицы которого быстро оседают на дно ванны. В связи с этим, представляют интерес технологии получения наночастиц непосредственно в водной среде, которая является основой для приготовления электролита. Одним из таких способов является получение наносuspензий методом импульсной лазерной абляции (ИЛА) твердофазных материалов в жидкость. В настоящей работе рассмотрена возможность осаждения композиционных покрытий на основе цинка из наноэлектролитов. Цинкование применяется для создания защитных покрытий на стальных поверхностях. При этом получение покрытия большой толщины может сопровождаться наводороживанием металла основы с повышением его хрупкости. В то же время тонкие цинковые покрытия не способны противостоять механическим повреждениям. Объектом исследований, отраженных в данной работе, явились покрытия на основе цинка, осажденные из наноэлектролитов, содержащих частицы на основе углерода. Цель работы – исследование влияния наночастиц на процесс формирования и характеристики электролитического цинка.

Материалы и методика эксперимента. За основу для получения электролитических цинковых слоев использовали стандартный электролит цинкования. Получали покрытия из наноэлектролитов, приготовленных двумя разными способами. В первом случае (электролит 1) в качестве модифицирующей добавки использовали ультрадисперсные кластеры синтетического углерода в виде порошка, полученного детонационным синтезом. Размер устойчивых агломератов названного порошка составляет 40-100 нм [2]. Во втором случае (электролит 2) для приготовления электролита использовали дистиллированную воду, в которой проводили абляцию графита, и, содержащую, таким образом, наноразмерные и субмикронные частицы. Абляцию проводили излучением неодимового лазера LS-2147 с длиной волны 532 нм. Частота импульсов составляла 10 Гц, энергия в импульсе – 75 мДж. Длительность импульсов составляла 30 нс (16 нс на полувысоте импульса). Лазерное излучение фокусировалось на графитовую мишень, находящуюся под слоем жидкости. Преимущественный размер частиц, полученных абляцией графита в воде, лежит в диапазоне от 20 до 60 нм [3].

Концентрация ультрадисперсных частиц в электролитах составляла 0,1 г/л. Подложкой служила поверхность стали 45. Исследование морфологии поверхности гальванических покрытий, сформированных из наноэлектролитов, осуществляли с помощью атомно-силовой микроскопии. Измерение микротвердости покрытий производили по стандартной методике.

Результаты и их обсуждение. Анализ изображений поверхности стальной подложки, полученных методом атомно-силовой микроскопии, на начальной стадии роста цинкового покрытия показал следующее. Из модифицированных наночастицами электролитов на поверхности катода формируется большее число центров кристаллизации. Установлено, что уже через одну минуту с момента начала осаждения, число центров кристаллизации цинка из электролита 1 в 1,5 раза превышает число таких образований из стандартного электролита. Еще более интенсивно образуются зародыши покрытия из электролита 2, полученного с использованием метода ИЛА. Их число более чем в 2 раза превышает аналогичный показатель для случая электроосаждения цинка из стандартного электролита. Объяснением этому может служить то, что присутствие на катоде адсорбированных частиц способствует образованию дополнительных центров кристаллизации. Различия могут быть вызваны разной энергией адсорбции частиц.

Осаждение цинка из наноэлектролитов, таким образом, может сопровождаться формированием более мелкой зеренной структуры покрытий, что влечет за собой изменение их физико-механических характеристик, в частности, увеличение твердости.

Оценка микротвердости покрытий показала, что модифицированный гальванический цинк, полученный из наноэлектролитов, обладает большей твердостью, чем базовый. Так показатель HV , полученный при нагрузке на алмазную пирамиду в 0,5 Н, для исходного покрытия составил 98 единиц; для покрытия из электролита, содержащего ультрадисперсные кластеры синтетического углерода – 108 единиц; для покрытия из электролита, содержащего продукты импульсной лазерной абляции графита – 110 единиц.

Заключение. Экспериментально установлено, при электроосаждении гальванического цинка из электролитов, содержащих наноразмерные частицы, последние оказывают влияние на кинетику роста покрытия, выступая в роли дополнительных центров кристаллизации. Показано, что микротвердость покрытий на основе цинка, полученных из наноэлектролитов, содержащих частицы на основе углерода, возрастает на величину порядка 10 %, по сравнению с аналогичными покрытиями из электролита без добавок.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Сайфуллин, Р.С. Композиционные покрытия и материалы / Р.С. Сайфуллин – М.: “Химия”, 1977. – 272 с.
2. Струк, В.А. Исследование структуры ультрадисперсных кластеров синтетического углерода и покрытий из электролитического хрома, модифицированного этими кластерами методом атомно-силовой микроскопии / В.А. Струк, А.Ф. Сенько// Второй Белорусский семинар по сканирующей зондовой микроскопии (СЗМ-2). Краткие сообщения. / Минск: ЗАО “Деловая инициатива”, 1997. — 87 с., ил.

3. Лещик, С.Д. Исследование частиц, генерированных лазерной абляцией твердых тел в жидкости / С.Д. Лещик, К.Ф. Зноско, Ю.К. Калугин // Вестник Брестского государственного технического университета. – 2014. – № 4. – С. 6-10.

УДК 621.793

ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССА ПЛАЗМЕННОГО НАПЫЛЕНИЯ ПОКРЫТИЙ ИЗ ДИФФУЗИОННО-ЛЕГИРОВАННОГО ПОРОШКА ПР-Х18Н9.

Пантелеенко А.Ф.

Белорусский национальный технический университет
г. Минск, Республика Беларусь

В последнее время широкое распространение получил новый класс материалов для создания покрытий – диффузионно-легированные порошки [1], отличительной особенностью которых является самофлюсуемость. Данные материалы активно применяются для напыления и наплавки покрытий, тем не менее, проблема поведения частиц порошка в процессе нанесения покрытий (в нашем случае плазменном напылении) малоизучена и требует большего внимания, так как от этого зависят механические и эксплуатационные характеристики изделия. При этом следует отметить, что ранее диффузионно-легированный порошок ПР-Х18Н9 для напыления не использовался. Применение его в качестве напыляемого материала является перспективным.

Диффузионно-легированные частицы порошка ПР-Х18Н9 являются композиционным микрообъектом. После диффузионного легирования на поверхности частиц образуются несколько слоев, которые существенно изменяют поведение частицы в плазменной струе по сравнению с необработанным ПР-Х18Н9. Это объясняется большими отличиями в теплофизических параметрах слоев. Следует также отметить, что боридная диффузионная оболочка выступает в роли «теплового барьера», который существенно замедляет скорость нагрева частицы.

Типичная микроструктура легированного порошка представлена на рисунке 1. Поскольку поведение такой композиционной частицы ранее не исследовалось, необходимо было более подробно описать поведение частицы в плазменной струе:

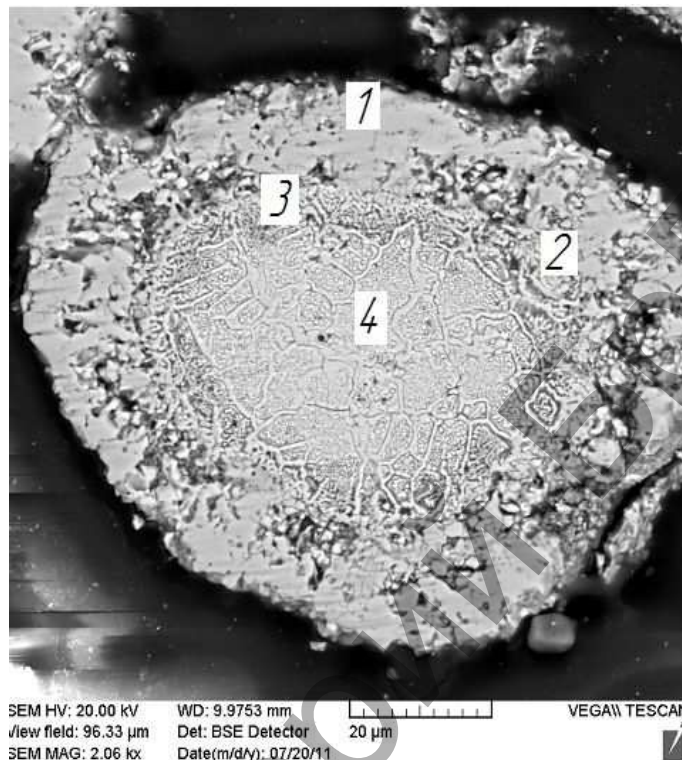
1. Интервал температур $1200...1250^{\circ}\text{C}$: при достижении данной температуры легкоплавкая эвтектика (3) на границе зон « Fe_2B - основа» начинает плавиться ($t_{\text{пл}} = 1200^{\circ}\text{C}$ [2]) и через некоторый временной промежуток полностью расплавляется. Остальные зоны (рисунок.1) остаются в твердом состоянии.

2. Интервал температур $1400...1450^{\circ}\text{C}$: при достижении данной температуры происходит плавление сердцевин (4) ($t_{\text{пл}} = 1400^{\circ}\text{C}$ [2]), зоны Fe_2B (2, $t_{\text{пл}} = 1389^{\circ}\text{C}$ [2]). Внешняя боридная оболочка FeB (1) остается твердой.

3. Интервал температур $1700...1750^{\circ}\text{C}$: при достижении данной температуры активно происходят процессы плавления внешней боридной оболочки FeB (1, $t_{\text{пл}} = 1650^{\circ}\text{C}$ [2]). Полное расплавление частицы происходит при достижении

температуры 1700°C на поверхности частицы и некоторого временного промежутка.

Следует отметить, что из-за различной теплопроводности материалов градиент температур по сечению частицы достаточно велик, но все 3 этапа происходят в указанной последовательности.



1- боридная оболочка из FeB ; 2- боридная оболочка из Fe_2B ; 3 – легкоплавкая эвтектика; 4 – аустенитно-ферритная сердцевина

Рисунок 1 – Микроструктура диффузионно-легированной частицы ПР-Х18Н9 (параметры обработки: $T=900^{\circ}\text{C}$, $t = 3$ часа).

Математическое моделирование проводилось на основе работ [3,4].

Динамика нагрева и охлаждения частиц определяется путем расчета их температурного поля и скорости при напылении.

Определение температурного поля проводилось по уравнению теплопроводности в сферических координатах.

$$\frac{\partial(\rho c T)}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \cdot \left(\lambda(T) r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right)$$

ρ и c - плотность и теплоемкость частицы в точке расчета;

T – температура, t – время; r – расстояние от центра частицы до точки расчета;

λ – теплопроводность в точке расчета.

Для расчета скорости использовалось дифференциальное уравнение вида

$$\frac{\partial V}{\partial t} = \frac{3Av_g(V_g - V_p)}{4d_p^2\rho_p}$$

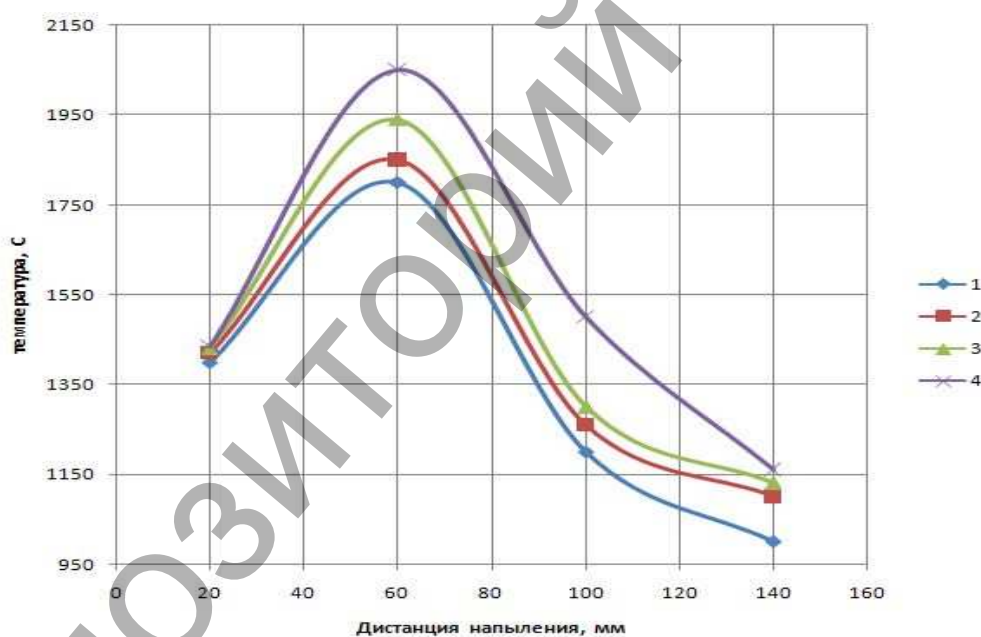
A - коэффициент динамического сопротивления;

v_g - динамическая вязкость газа;

V_g и V_p - скорости газа и частицы соответственно;

ρ_p - плотность частицы (рассчитывалась с учетом двухслойности).

Математическое моделирование процессов поведения борированных в течение разного времени частиц различной грануляции в плазменном потоке проводилось при следующих параметрах: плазмообразующий газ - азот; напряжение дуги - 350 В; сила тока - 70 А; расход плазмообразующего газа - 50 л/мин; диаметр сопла плазмотрона - 4 мм. Проведенные эксперименты показали, что именно указанные параметры обеспечивают получение оптимальных покрытий при минимальных энергозатратах. Для моделируемых процессов брался наиболее часто применяемый диапазон порошковых материалов 40-120 мкм. Результаты моделирования в виде зависимости температуры частиц от дистанции напыления представлены на рисунке 2.



1- легированная частица размером 50 мкм; 2- легированная частица размером 80 мкм; 3 - легированная частица размером 120 мкм; 4 - частица ПР-Х18Н9

Рисунок 2 - Зависимость температуры частиц при плазменном напылении от дистанции

В результате математического моделирования было определено, что частицы размером более 80 мкм не успевают достаточно прогреться в плазменной струе, и не обеспечивается необходимое качество покрытия. Был также проведен ряд экспериментов по распылению легированных частиц плазменной струей в воду с дальнейшим исследованием микроструктуры и фазового состава распыленного порошка. Полученные данные показывают, что даже частицы

небольшого размера (40-50 мкм) не всегда успевают полностью расплавиться в различных зонах плазменной струи. Был отмечен лишь факт разрушения боридных оболочек при ударе о поверхность воды. Поэтому можно предположить необходимость использования для плазменного напыления легированного порошка ПР-Х18Н9 размером не более 80 мкм.

Все вышесказанное позволяет предположить необходимость последующей обработки высококонцентрированными потоками энергии для получения однородных по составу и свойствам покрытий.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Пантелеенко, Ф.И. СДЛП на железной основе и защитные покрытия из них/ Ф.И. Пантелеенко. – Мн.: УП «Технопринт», 2001. – 300с.
2. Самсонов, Г. В. Бориды./ Г.В. Самсонов, Т.И.Серебрякова, В.А.Неровнов. — Киев : Наук, думка, 1975.— 376 с.
3. Копьютерное моделирование процессов плазменного напыления покрытий./ С.П.Кундас, А.П.Достанко, А.Ф.Ильющенко и др. – Мн.: Бестпринт, 1998. - 212 с.
4. Износостойкие газотермические покрытия из диффузионно-легированных порошков на основе чугуновой стружки: В.М.Константинов, Н.В.Спиридонов, О.Г.Девойно, А.М.Авсиевич и др. Под ред. Ф.И.Пантелеенко. – Мн.: Технопринт, 2005. – 146 с.

УДК 621.923.1

РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ В ЗАГОТОВКЕ ПРИ ПЛОСКОМ ШЛИФОВАНИИ С УЧЕТОМ ГИДРОДИНАМИКИ СОЖ

Федоров Д.Г., Пластинин А.А.

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

Шлифование является одним из самых широко распространенных методов финишной обработки деталей машин, в том числе ответственных деталей двигателей летательных аппаратов. Характерной особенностью обработки шлифованием является большое тепловыделение в узкой области вблизи зоны резания. Эта специфика обусловлена высоким влиянием процессов трения.

Исходя из вышесказанного, целью работы является создание методики расчета температурных полей в зоне резания при плоском шлифовании титановых заготовок.

Достижение поставленной цели обеспечивается на основе комплекса теоретико-экспериментальных исследований, включающих в себя разработку конечно-элементной модели расчета среднетемпературной температуры в зоне резания и оценку ее погрешности путем сопоставления результатов расчета с апробированной математической моделью.

В качестве расчетной программы для проведения виртуального расчета был выбран модуль CFX в программе ANSYS. Обычно этот модуль используется для расчета гидро- и газодинамических процессов протекающих в различных каналах и позволяет рассчитывать термодинамические процессы.

Возможности программы и основные ее преимущества были адаптированы для процессов механической обработки. Основной сложностью при создании модели являлось то, что программа требует в качестве расчетной системы канал, а зона обработки станка представляет собой открытую область пространства, заполненную воздухом.

Для преодоления данной проблемы было принято решение создать геометрическое тело, которое программа воспринимала бы как канал, в котором протекает рассчитываемый процесс. Созданное тело должно минимально влиять на расчетную область минимизируя тем самым погрешность расчета. Адаптированная модель представлена на рисунке 1.

Разработанная модель включает в себя 3 тела. Шлифовальный круг, заготовку (представляет собой частично обработанную заготовку), атмосферу вокруг технологической системы и внутри патрубков, подающего СОЖ. Тепловой поток q прикладывается к поверхности обработки на заготовке, которая в свою очередь имеет тепловой контакт с атмосферой. СОЖ задается только на входе в патрубков, и её течение полностью рассчитывает программный комплекс. Согласно источнику [1] в круг уходит 1-2% всего тепла, выработанного при обработке, в виду крайне малой теплопроводности керамической связки. По этой причине тепловой контакт шлифовального круга с остальной системой не задавался.

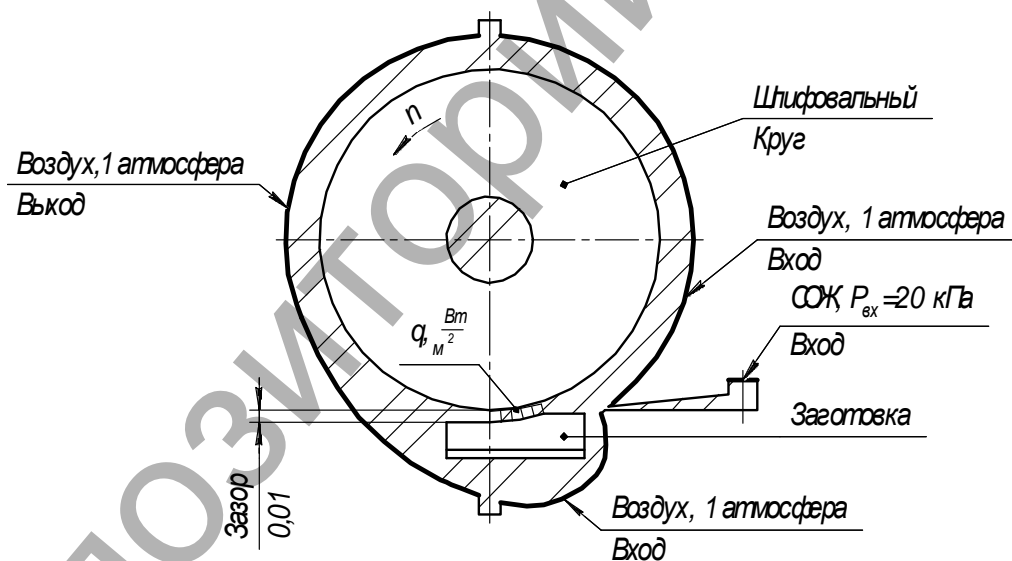


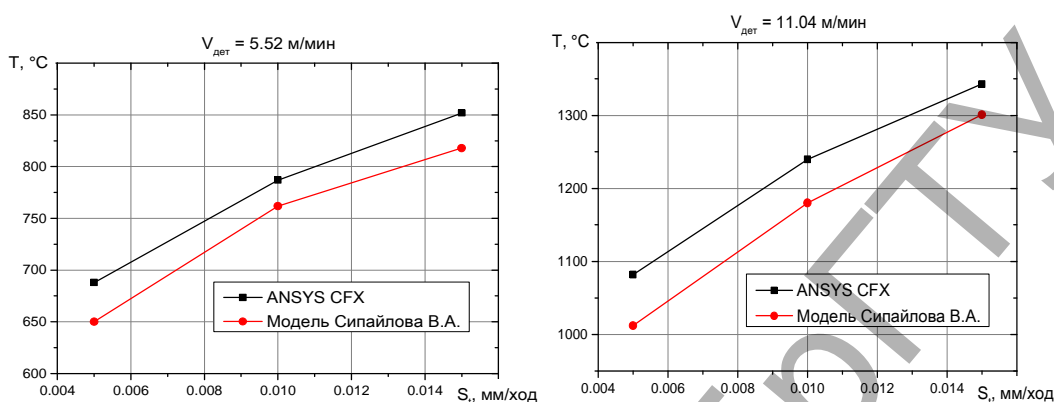
Рисунок 1 – Принципиальная схема расчетной модели и прикладываемые к ней граничные условия

По итогам проведенной работы представлены результаты расчета температуры в образце из титанового сплава марки ВТ-6 методом конечных элементов. Основной отличительной особенностью созданной виртуальной модели стал учет гидродинамики СОЖ, охлаждающей обрабатываемый виртуальный образец. Виртуальный образец по своим физическим и геометрическим свойствам повторяет натурные образцы подлежащие обработке на различных режимах.

При проведении исследований использовался метод планирования эксперимента. Полученные результаты были сопоставлены с численной моделью Си-

пайлова В.А. [2] Сравнение результатов расчета по двум разным методикам представлено на рисунке 2 в виде графиков.

Планируется проведение экспериментальных исследований, с целью дальнейшего подтверждения адекватности модели.



а – $V_{кр} = 35$ м/с, $V_{заг} = 5,5$ м/мин

б – $V_{кр} = 35$ м/с, $V_{заг} = 11,04$ м/мин

Рисунок 2 – Зависимость температуры от режимов резания

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Лурье Г.Б. Шлифование металлов. М.: Машиностроение, 1969. 172 с.
2. Сипайлов В.А. Тепловые процессы при шлифовании и управление качеством поверхности. – М.: Машиностроение, 1978 – 167 с.

УДК 544.22

УЛЬТРАЗВУКОВОЙ СИНТЕЗ ОКСИДА ВОЛЬФРАМА (WO_3) И ОКСИДОВ КОБАЛЬТА (Co_3O_4 , CoO , $CoOOH$)

Гайдук Ю.С., Ломоносов В.А., Савицкий А.А.

Белорусский государственный университет

Минск, Республика Беларусь

В последнее время достаточно широко изучаются возможности ультразвукового метода для получения нанодисперсных оксидов металлов. В литературе имеются лишь единичные публикации, посвященные изучению ультразвукового синтеза оксида вольфрама [1], а публикаций, посвященных ультразвуковому синтезу оксидов и гидроксосоединений кобальта, авторами не обнаружено.

Известно, что в большинстве случаев уменьшение размера частиц и увеличение удельной поверхности приводит к заметному возрастанию газовой чувствительности оксидов. Золь-гель метод, равно как и гидротермальный, позволяют получать оксид вольфрама с размером частиц $15 \div 100$ нм.

Целью настоящей работы являлось изучение структурных и морфологических особенностей оксидов вольфрама, кобальта и оксигидроксида кобальта, полученных в процессе ультразвукового синтеза, по сравнению с традиционными методиками.

Методика эксперимента. Оксид вольфрама и оксид кобальта получали из 1,23 М водного раствора вольфрамата натрия $\text{Na}_2\text{WO}_3 \times 2\text{H}_2\text{O}$ путем капельного вливания в 12 М раствор азотной кислоты. Оксид кобальта Co_3O_4 получали из 2,3 М водных растворов сульфата кобальта $\text{CoSO}_4 \times 7\text{H}_2\text{O}$ путем добавления 9,24 М водного раствора аммиака и последующего удаления электролитов. Оксид CoO получали прокаливанием Co_3O_4 на воздухе в течение 2 ч при 920 °С.

Для получения гидрозоля CoOON 56 г KOH в 300 мл H_2O приливали при перемешивании по каплям к раствору 90 г $\text{CoSO}_4 \times 7\text{H}_2\text{O}$ в 1300 мл H_2O , содержащему 12 мл Br_2 . После формирования золя (3 ч) и однократной декантации осадок промывали до исчезновения следов электролитов.

Ультразвуковой синтез проводили из растворов тех же концентраций, с той же последовательностью и скоростью смешения реагентов в ультразвуковой ванне BOUDOLIN с частотой 29 кГц.

Рентгенографические исследования проводили с использованием дифрактометра ДРОН-3 ($\text{Co-K}\alpha_1$ -излучение), для расчетов значений ОКР использовали одинарный рефлекс с индексами Миллера [1 2 0]. Образование и изменение фазового состава Co_3O_4 и CoOON изучали на дифрактометре ДРОН-3 ($\text{Cu-K}\alpha$ -излучение).

Средние размеры кристаллитов (области когерентного рассеяния, ОКР) определяли по формуле Дебая–Шеррера (1):

$$D=0,9\lambda/\beta\cos\alpha \quad (1)$$

Параметры кристаллической решётки определяли при помощи компьютерной программы UnitCell по методу Холланда–Редфрена.

Удельную поверхность по методу низкотемпературной адсорбции азота (БЭТ) определяли на установке Клячко–Гурвича. Относительная погрешность измерения составляла $\pm 20\%$.

Результаты и обсуждение. Рентгенографические исследования процесса образования оксида вольфрама показали формирование на стадии сушки ксерогеля H_2WO_4 [PDF 18–1420]. Отжиг при 200 – 800 °С приводил к формированию моноклинной структуры WO_3 [PDF 87–2404]. При 220 °С степень кристаллизации оксида вольфрама ещё невысока, в то время как рентгенограммы образцов, отожжённых при 600 °С и 800 °С, практически идентичны, что указывает на завершение процесса кристаллизации до 600 °С (таблица 1).

Высушенный при 20 °С ксерогель, полученный из вольфрамата натрия по вышеописанной методике, представляет собой гидратированную вольфрамовую кислоту $\text{H}_2\text{WO}_4 \times \text{H}_2\text{O}$ [PDF 87–2404], которая при отжиге теряет воду и кристаллизуется в виде моноклинной модификации триоксида вольфрама. После отжига при 200 – 850 °С (2 ч) образцы имели ОКР от 60 до 200 нм.

При ультразвуковом сопровождении процесса синтеза ксерогель H_2WO_4 уже содержит в значительном количестве частицы WO_3 [PDF 87–2404], а материал, отожжённый при 200 – 850 °С, характеризуется более низкими значениями ОКР. Так, отжиг ксерогеля приводил к образованию оксида вольфрама с ОКР 90 – 100 нм (300 °С, 2 ч) и 160 – 170 нм (600 °С, 2 ч) при стандартном проведении золь-гель

процесса. В то же время для материала, полученного с ультразвуковым сопровождением, эти значения составляют 50 и 140 – 150 нм, соответственно.

Материал, полученной высушиванием осаждённых гидроксосоединений кобальта, представлял собой аморфный продукт с удельной поверхностью 16,4 м²/г. Последующий отжиг приводил к разложению смеси гидроксо- и оксосоединений и образованию Co₃O₄ [JCPDS 73–1701] с ещё меньшими значениями удельной поверхности. По мере увеличения температуры отжига степень кристаллизации увеличивается, ширина пиков и ОКР растёт (таблица 1), что также указывает на протекание процесса спекания.

Высушенный при 20 °С гидрозоль CoOОН представлял собой практически аморфный продукт с рядом слабовыраженных рефлексов кристаллической фазы. Отжиг при 180 °С приводил к заметному росту степени кристалличности, материал представлял собой CoOОН ромбоэдрической структуры с пространственной группой R3m [JCPDC 14–0673].

Таблица 1. Параметры кристаллической решётки и удельная поверхность WO₃ и соединений кобальта (Co₃O₄, CoO, CoOОН).

Состав и температура отжига (время отжига 2 ч)	a, нм	b, нм	c, нм	β, °	ОКР, нм	S, м ² /г
WO ₃ ×H ₂ O (H ₂ WO ₄), высушенный при 20 °С ксерогель	7,398	6,931	3,7176	91,04	70 – 80	29,9 ÷ 31
WO ₃ , золь-гель, 200 °С	7,328	7,527	7,732	91,40	70 – 80	51 ÷ 52
WO ₃ , золь-гель, 350 °С	7,317	7,527	7,726	91,34	100	—
WO ₃ , золь-гель, 450 °С	7,297	7,539	7,693	90,93	100 – 110	—
WO ₃ , золь-гель, 650 °С	7,297	7,530	7,711	90,91	160 – 170	2,9 ÷ 3,5
WO ₃ , золь-гель, 850 °С	7,299	7,537	7,698	90,90	200 – 210	—
WO ₃ ×H ₂ O (H ₂ WO ₄), ультразв., сушка 20°С	смесь WO ₃ и H ₂ WO ₄					—
WO ₃ , ультразв., 300 °С, 2 ч	7,3226	7,512	7,668	90,73	50	—
WO ₃ , ультразв., 600 °С, 2 ч	7,2964	7,5606	7,6880	90,446	140 – 150	23
Состав и условия отжига		a, нм	ОКР, нм			
CoO _x , высушенный при 20 °С ксерогель		смесь оксо- и гидроксо- соединений кобальта				
Co ₃ O ₄ , золь-гель, 200 °С		8,064	80 – 100			
Co ₃ O ₄ , золь-гель, 300 °С		8,068	110 – 120			
Co ₃ O ₄ , золь-гель, 450 °С		8,081	200			
Co ₃ O ₄ , золь-гель, 600 °С		8,089	250			

Co ₃ O ₄ , золь-гель, 800 °С	8,084	400		
CoO _x , ультразв., высушенный при 20°С ксерогель	смесь оксо- и гидро-ксо-соединений кобальта			
Co ₃ O ₄ , ультразв., 300 °С, 2 ч		2 – 3		
Co ₃ O ₄ , ультразв., 600 °С, 2 ч		5 – 6		
CoO, золь-гель, 920 °С		40 – 50		
CoO, ультразв., 920 °С		40 – 50		
Состав и условия отжига	а, нм	с, нм	ОКР, нм	S, м ² /г
CoOОН, осаждение, высушенный при 20°С гидрозоль	2,881	13,16	4 ÷ 5	74 ÷ 85
CoOОН, осаждение, 180 °С, 2 ч	2,86	13,233	5 ÷ 6	110
CoOОН, ультразв. синтез, высушенный при 20°С гидрозоль	2,866	13,199	5	115
CoOОН, ультразв. синтез, 180°С, 2 ч	2,87	13,210	6	85

Выводы. Ультразвуковой синтез оксидов вольфрама (WO₃) и кобальта (Co₃O₄, CoO) является эффективным способом получения нанодисперсных поликристаллических материалов. По сравнению с традиционным золь-гель методом ультразвуковой синтез позволяет получить материалы с большей удельной поверхностью и меньшим эквивалентным диаметром частиц, что изменяет ширину запрещённой зоны и энергию активации проводимости. Такие изменения приводят к росту газовой чувствительности и снижением рабочей температуры датчиков. В случае синтеза CoOОН ультразвуковое воздействие не оказывает существенного воздействия на размер и морфологию получаемых частиц.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Vijaya K. Rangari, Tarig A. Hassan, Quentin Mayo and Shaik Jeelani. Effect of ultrasound on tungsten oxide nanoparticles and its applications in epoxy nanocomposites. Proceeding of 16th international conference on composite materials, June 22 – 26, 2014, Seville, Spain. – P. 1 – 5.

УДК 621.793

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СКАНИРУЮЩЕЙ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ ДЛЯ УПРОЧНЕНИЯ ЧУГУННЫХ ДЕТАЛЕЙ

Девойно О.Г.¹, Жарский В.В.², Кардаполова М.А.¹, Пилипчук А.П.³

1) Белорусский национальный технический университет,

2) 000 «Рухсервомотор», 3) Военная академия Республики Беларусь,
г. Минск, Беларусь

В промышленности все более широкое распространение получают новые технологии, использующие в качестве инструмента высококонцентрированные источники нагрева, к которым относится и технология лазерной поверхностной термообработки. Появление мощных твердотельных лазеров, в частности оп-

товолоконных, позволило вывести лазерную технологию на качественно новый уровень.

Это касается, в первую очередь, высокой надежности таких установок по сравнению с газовыми лазерами. Во-вторых, практически сняты ограничения по мощности излучения. В-третьих, возможность транспортировки мощного излучения через оптоволокно значительно облегчает как конструктивные задачи при создании технологических лазерных комплексов, так и многие технологические проблемы.

Существенный прогресс в лазерной технологии обеспечивает использование сканирующих оптических систем, суть которых заключается в следующем. Генерируемый в оптоволоконном лазере луч, транспортируется через оптоволокно в специальную оптическую головку. Проходя через коллиматор, он преобразуется в параллельный пучок, а затем направляется на два зеркала, встроенных в сканирующие однокоординатные системы, обеспечивающие программно согласованное сканирование во взаимно перпендикулярных направлениях.

Далее луч через фокусирующую и поворотную оптику транспортируется в зону обработки. Учитывая, что твердотельные лазеры позволяют менять мощность излучения с очень высокой скоростью, появилась возможность программного изменения мощности в течение каждого цикла сканирования, что, в свою очередь, обеспечивает возможность привысокой частоте сканирования рисования «псевдопятна» с требуемым распределением энергии по его площади. Управляя распределением энергии по сечению пятна можно получить требуемую конфигурацию тепловых полей и, соответственно, управлять процессами в поверхностных слоях, протекающих в процессе лазерного воздействия. Это касается как аспектов повышения производительности обработки, так механизма перемешивания ванны расплава вследствие реализации «термокапиллярного эффекта». Эффективное управление процессами лазерного упрочнения в случае применения лазерной сканирующей обработки невозможно без предварительных теоретических оценок формируемых при такой обработке тепловых полей.

В настоящее время при моделировании процессов лазерной обработки для представления распределения интенсивности лазерного излучения по сечению лазерного пятна наиболее часто используются упрощенные представления распределения интенсивности лазерного излучения, в первую очередь, аппроксимация лазерного излучения функцией равномерного распределения или аппроксимация функцией Гаусса. Это связано с возможностью аналитического описания указанных функций. Данные способы упрощения в общем случае немонотонного излучения неточно описывают реальный поток мощности, что подтверждают представленные в работах [1] результаты. Учет реально формируемых распределений энергии в зоне воздействия лазерного луча, как правило, требует использования численных методов расчета [2].

Более точный учет распределения энергии по сечению «псевдопятна» лазерного воздействия при аналитическом решении возможен путем представления

моделей распределения интенсивности излучения немонотонного поверхностного источника в виде многообразия сдвигов базисной функции. Отправным пунктом предлагаемого представления являются работы американского ученого Н. Винера, развитые в дальнейшем математиком Ахиезером [3]. В работах доказана возможность аппроксимации произвольной функции математической конструкцией $W(x, N)$ вида

$$W(x, N) = \sum_{n=1}^N A_n \cdot F(x - \lambda_n) \quad (1)$$

которая, по сути, является линейным многообразием сдвигов N базисных функции $F(x)$. Данное аналитическое представление полностью определено вектором параметров, составленным из коэффициентов разложения $\{A_n\}_N = \{A_1, \dots, A_N\}$ и величин соответствующих сдвигов $\{\lambda_n\}_N = \{\lambda_1, \dots, \lambda_N\}$, которые были использованы при разработке методики оценки немонотонного распределения интенсивности лазерного излучения [4].

В качестве примера оценки влияния распределения энергии в «псевдопятне» лазерного воздействия на форму тепловых полей рассматривалось два варианта (рисунок 1).

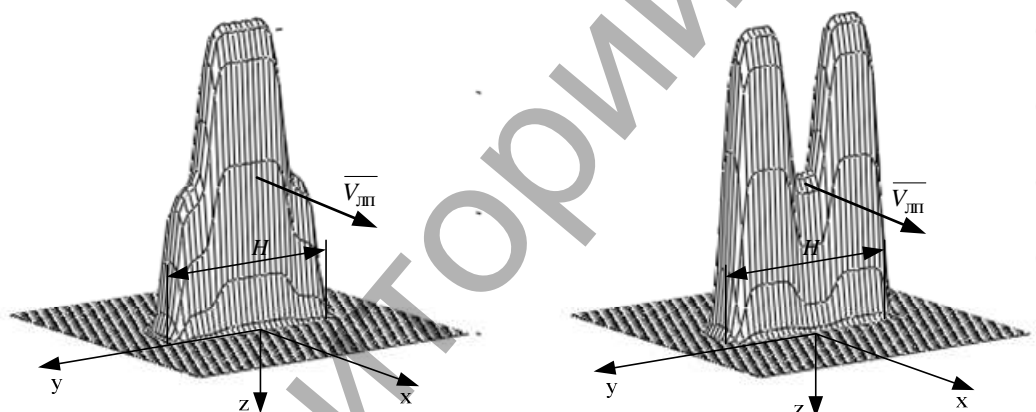


Рисунок 1 – Варианты распределения энергии в псевдопятне лазерного воздействия при сканирующей лазерной обработке.

Результаты численных оценок для сканирующей лазерной обработки чугуна ВЧ50 при мощности излучения 1,2 кВт, частоте сканирования 220 Гц представлены на рисунке 2. Важной особенностью сканирующей лазерной обработки с использованием оптоволоконных лазеров для поверхностного упрочнения является существенное повышение производительности обработки по сравнению с обработкой излучением CO₂ лазеров. На рисунке 3 представлены результаты оценки производительности лазерного термоупрочнения для разных вариантов упрочнения. Как видно из представленных данных, использование лазерной сканирующей обработки обеспечивает повышение производительности обработки от 3 до 5 раз. Учитывая, что коэффициент полезного действия газовых лазеров составляет 8-10%, а оптоволоконных 25-30 %, становится очевид-

ным, что энергоэффективность лазерной сканирующей обработки выше в 10 - 12 раз, по сравнению с использованием излучения CO₂ лазера.

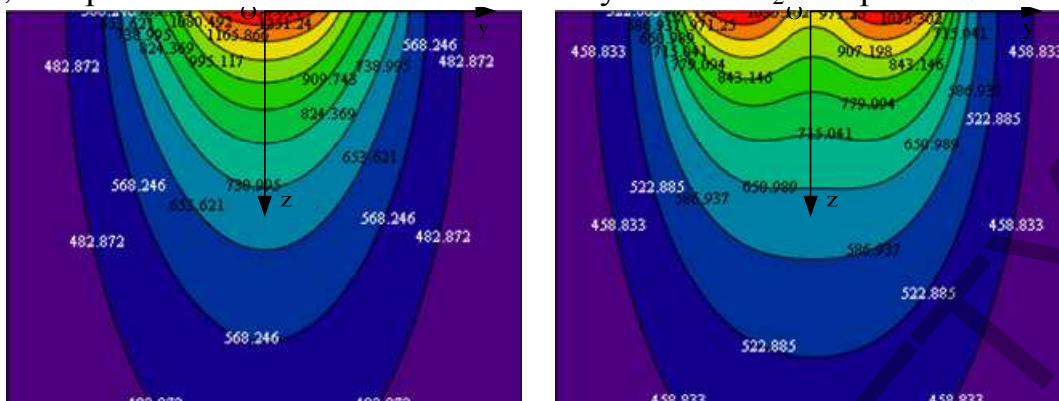


Рисунок 2 – Формы распределения тепловых полей в поперечном по отношению к движению луча направлении при разных распределениях энергии по сечению пятна

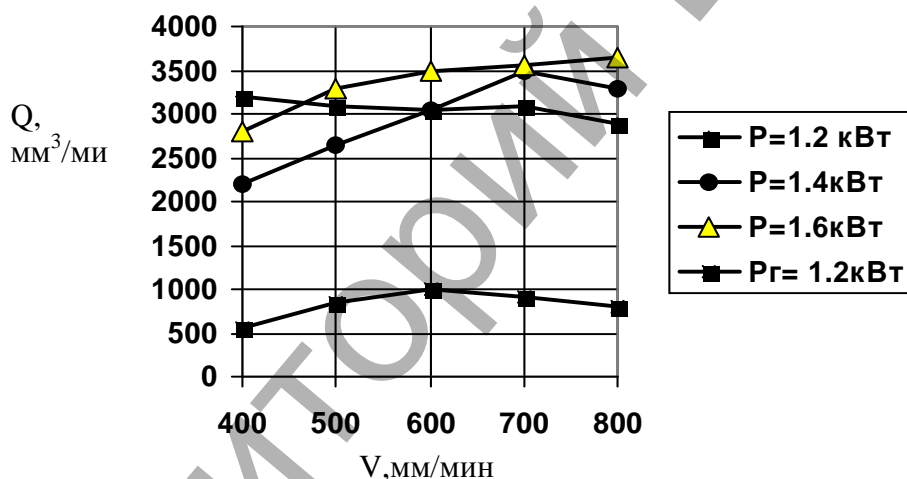


Рис 3 Производительность лазерной обработки с использованием сканирующей обработки излучением волоконного (P) и газового (P г) лазера

Выводы: 1. Показано, что использование сканирующей лазерной обработки является эффективным методом управления процессом лазерной поверхностной обработки. 2. Установлено, что использование сканирующего излучения оптоволоконного лазера обеспечивает повышение энергоэффективности в 10-12 раз по сравнению с закалкой излучением газового лазера.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Григорьянц А.Г. Технологические процессы лазерной обработки /А.Г. Григорьянц, И.Н. Шиганов, А.И. Мисюров. – М. Изд. МВТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. – 633 с.
2. Лазерные технологии обработки материалов: современные проблемы фундаментальных исследований и прикладных разработок. / Под ред. В.Я.Панченко. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. – 664 с.

3. Углов, А.А. Учет немонотонности пространственного распределения лазерного излучения при расчете режимов термической обработки массивных изделий / А.А. Углов [и др.] // *МиТОМ*. – 1989. – № 11. – С. 9 – 13. 4. Югов В. Высокоэффективная технология ресурсосбережения: лазерная поверхностная обработка // *Фотоника*. – 2012. №4. с. 12-20.

УДК 621.785

ИЗНОСОСТОЙКИЕ ДИФФУЗИОННЫЕ СЛОИ СО СТРУКТУРОЙ ШАРПИ

Менделеева О.Л.

Белорусский национальный технический университет,
Минск, Республика Беларусь

Для эксплуатации в условиях трения и высоких удельных нагрузок требуется конструкционный материал со структурой композита - сталь с термически упрочненной, вязкой сердцевиной и износостойким диффузионным слоем на поверхности.

Износостойкие структуры Шарпи содержат металлоподобные соединения, прочно удерживаемые в пластичной матрице твердого раствора. Такая матрица обладает высокой ударной вязкостью и пластичностью, и, следовательно, значительной демпфирующей способностью. И, хотя пластическая деформация в микрообъемах твердого раствора вокруг кристаллов упрочняющих фаз характеризуется высоким уровнем микронапряжений, но поглощенная матрицей энергия (теплота пластического трения) инициирует рекристаллизационные процессы, благодаря которым состояние структуры отличается малой дефектностью и близко к равновесному.

Существуют некоторые требования к кристаллической структуре упрочняющей фазы (металлоподобного соединения). Его кристаллическая структура должна обладать симметрией кубической или гексагональной сингонии - это обеспечит кристаллу металлоподобного соединения удовлетворительные в условиях трения механические характеристики, такие как модуль упругости, временное сопротивление разрушению при одноосном растяжении, прочность при изгибе и микротвердость.

Периоды кристаллических решеток сопряженных фаз должны значительно отличаться, чтобы межфазная граница соединения с твердым раствором была некогерентной с высокой энергией поверхностей раздела. Но удельные объемы фаз должны быть близки, в этом случае кристаллизация соединения в пластичной матрице пройдет с небольшим объемным эффектом, и энергия упругих взаимодействий будет иметь небольшую величину.

При соблюдении этих условий граница раздела фаз будет криволинейной, а форма кристаллов соединения - близкая к сфероидной (не угловатая). Это позволит снизить количество микроконцентраторов напряжений (и избежать зарождения хрупкой трещины).

За период приработки пары трения происходит частичное удаление с поверхности более мягкого материала матрицы (твердого раствора) и формируется микрорельеф с выступающими кристаллами соединения. Коэффициент трения значительно снижается за счет уменьшения площади контакта поверхно-

стей, а также высоких значений микротвердости и нормального модуля упругости металлоподобных соединений, стойких к истиранию. При наличии смазки коэффициент трения снижается до величин, близких к нулю, т.к. в структурах Шарпи возникает эффект «гидропланирования»: смазка при высоких скоростях вращения, находится в условиях всестороннего сжатия.

Структуру Шарпи можно получить в диффузионных слоях на основе твердого раствора. Основным критерием выбора насыщающего элемента является его растворимость в основном металле сплава и способность образовать металлоподобное соединение с компонентами сплава. В таких системах при равновесных условиях ХТО формируется диффузионный слой с поверхностной зоной соединения, отделенной границей раздела от других зон, расположенных ниже. Чтобы при температуре ХТО не происходила кристаллизация упрочняющей фазы в виде отдельной зоны диффузионного слоя, следует изменить технологические параметры ХТО и спровоцировать кристаллизацию изолированных кристаллов соединения в микрообъемах пересыщения твердого раствора или его распад в процессе последующего охлаждения или термической обработки. Упрочнение поверхности при формировании структуры Шарпи эффективнее в диффузионных слоях на основе многокомпонентных твердых растворов.

Примеры технологических решений ХТО:

1. Если насыщающий элемент испытывает большее сродство к легирующим элементам сплава, а не к основному металлу, то в результате встречной диффузии легирующих элементов к поверхности происходит кристаллизация соединений. Образование изолированных кристаллов соединений возможно при большей скорости диффузии насыщающего элемента по сравнению с компонентами сплава или при термоциклическом режиме ХТО. Пример: карбидизация сталей (при температуре ХТО структура диффузионного слоя: дисперсные включения карбидов в аустените).

2. Если насыщающий потенциал среды хотя бы частично перекрывает область гомогенности соединения, но соединение имеет температуру кристаллизации ниже температуры ХТО, то микрообъемы твердого раствора с максимальным содержанием насыщающего элемента формируются не на поверхности насыщения, а на некотором удалении от нее. В таких микрообъемах образуются изолированные дисперсные кристаллы соединения. Пример: хромирование низкоуглеродистых сталей в высокохромистых средах (структура диффузионного слоя: дисперсные включения σ -фазы в феррите).

3. Если в процессе ХТО изменять мощность диффузионного источника, то кристаллы соединения, образовавшиеся в период насыщения при избыточном потенциале среды, будут частично растворяться в «диффузионный» период за счет отвода насыщающего элемента от поверхности вглубь изделия. Такая технология позволяет получать диффузионные слои большой толщины, избежать образования сетки вторичной фазы (металлоподобного соединения) и значительно повысить прочностные характеристики диффузионного слоя за счет присутствия большого количества дисперсных сфероидных кристаллов. При-

мер: вакуумная цементация (при температуре ХТО структура диффузионного слоя: дисперсные включения карбидов в аустените).

4. Если насыщающий элемент ограничено растворим в основном металле и при температуре ХТО формируется пересыщенный по насыщающему элементу твердый раствор, то при старении происходит его распад с выделением изолированных дисперсных кристаллов фазы более богатой насыщающим элементом. Пример: старение зоны внутреннего азотирования сталей, легированных нитридообразующими элементами (структура диффузионного слоя: дисперсные включения нитридов в феррите).

УДК 535.21:621.357.77

РАЗМЕРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЧАСТИЦ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ИМПУЛЬСНОЙ ЛАЗЕРНОЙ АБЛЯЦИИ МЕТАЛЛОВ В ЖИДКОСТИ

Лецик С.Д., Шупан П.И., Сергиенко И.Г.

Гродненский государственный университет имени Янки Купалы Гродно, Республика Беларусь

В связи с возросшим интересом к свойствам объектов нанометрового масштаба в последние десятилетия активно исследуются процессы, протекающие при лазерном воздействии на вещество. Вследствие взаимодействия лазерного излучения с веществом часть материала мишени удаляется в окружающую среду. Известно, что наночастицы практически любого материала образуются при воздействии на него достаточно мощного лазерного импульса. Лазерная абляция твердых мишеней, погруженных в жидкость, является известным способом получения различных наночастиц [1].

В зависимости от интенсивности лазерного излучения продуктами абляции могут быть атомы, ионы, молекулы вещества, а также сформированные кластеры и наночастицы, вылетающие из зоны воздействия с высокой кинетической энергией. Аблированные при высокой температуре атомы вещества могут взаимодействовать с молекулами окружающей среды с образованием новых соединений [2]. Если окружающей средой является жидкость, тогда возможно получать кинетически устойчивые коллоидные растворы. Лазерная абляция представляет интерес как с точки зрения формирования структур на поверхности мишени, так и с точки зрения образования наночастиц.

Материалами облучаемых мишеней при ИЛА являлись никель и цинк. В качестве жидкой среды, в которой осуществлялась абляция, использовали дистиллированную воду. Абляцию осуществляли с помощью неодимового лазера LS-2147 при различных режимах: абляция никеля при длине волны 532 нм., энергии в импульсе 30 мДж.; абляция цинка при длине волны 1064 нм., энергии в импульсе 10 мДж. Импульсы следовали с частотой 10 Гц; количество импульсов – 18000. Мишени находились под слоем дистиллированной воды на глубине 8 мм.

С целью получения данных о размерных характеристиках и общем виде продуктов абляции пробы суспензий в виде капель наносились на подложку из кварцевого стекла. После высыхания суспензии образцы изучали на атомно-силовом микроскопе NT-206: сканирование осуществлялось на воздухе, при нормальных условиях и комнатной температуре с использованием кантилевера CSC 38/AIBS жесткостью 0,03 Н/м.

На рисунке 1 представлены изображения частиц, полученные в результате ИЛА никеля и цинка в дистиллированной воде.

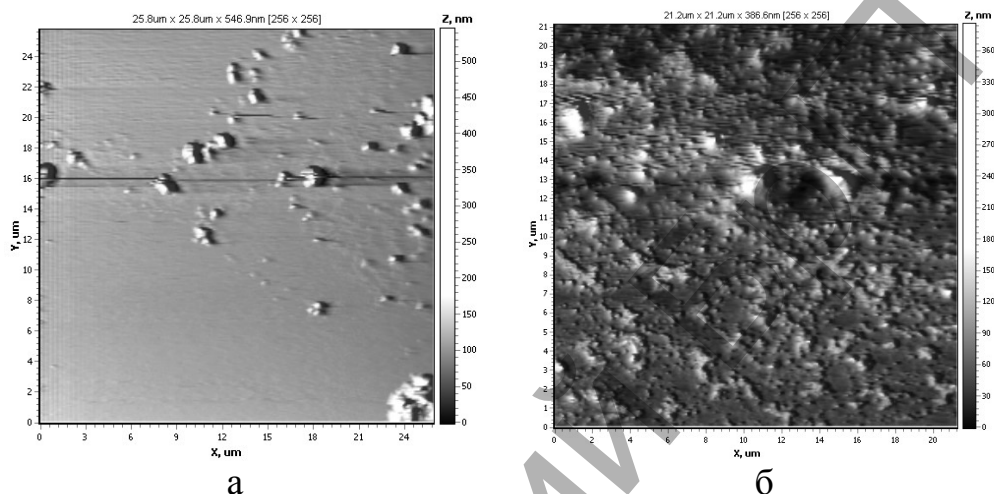


Рисунок 1 – АСМ-изображения частиц, полученных импульсной лазерной абляцией никеля (а) и цинка (б) в дистиллированной воде

На изображениях видны как скопления наноразмерных частиц, так и достаточно крупные конгломераты субмикронного и микронного уровней. Очевидно, что при лазерной абляции металлов происходит взаимодействие газов, растворенных в жидкости, с окружающей средой, вследствие чего наночастицы окисляются из-за большой удельной поверхности [3].

Известно, что при столкновении продуктов лазерной абляции никеля с водой на поверхности происходит кристаллизация. Кинетическая теория кристаллизации рассматривает много факторов которые определяют процесс образования зародышей. Вероятность того или иного механизма зарождения связана с величиной переохлаждения системы, материалом подложки, с толщиной конденсата, с углом смачивания, плотности налетающих частиц и т. д. [4].

Процентное распределение размерных характеристик частиц, полученных в результате ИЛА никеля и цинка, представлено на рисунках 2 и 3.

Установлено, что основное количество нанопродуктов, образующихся при импульсной лазерной абляции никеля с длиной волны 532 нм, представляют собой частицы (конгломераты частиц) размером до 40-60 нм (по оси Z на АСМ-изображениях). Наличие крупных частиц объясняется агломерацией более мелких, однако их доля (более 100 нм.) не превышает 5%. При импульсной лазерной абляции цинка с длиной волны 1064 нм основная доля частиц приходится на размеры от 20 до 60 нм доля более крупных частиц составляет не более 2%.

Таким образом, импульсной лазерной абляцией никеля и цинка в дистиллированной воде возможно получение частиц нанометрового размерного уровня. Использование атомно-силовой микроскопии позволяет определять размерные характеристики продуктов абляции.

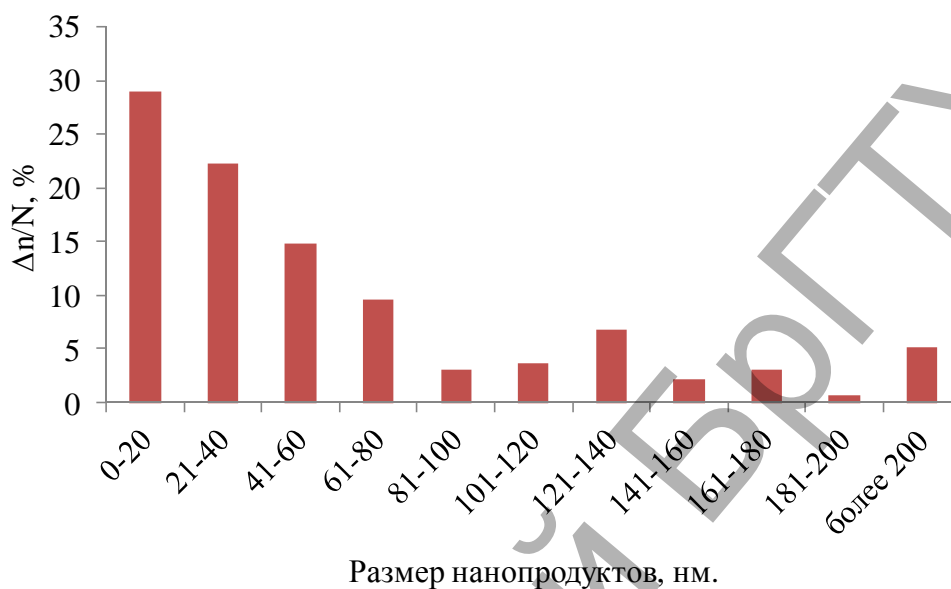


Рисунок 2 – Гистограмма распределения частиц, полученных при лазерной абляции никеля в дистиллированной воде, по размерам, %

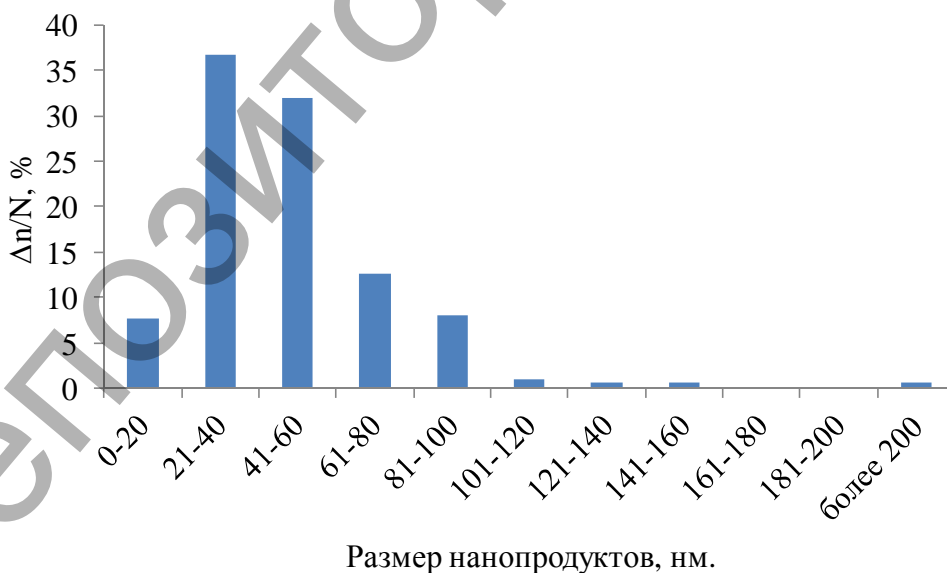


Рисунок 3 – Гистограмма распределения частиц, полученных при лазерной абляции цинка в дистиллированной воде, по размерам, %

Результаты данной работы могут быть использованы при разработке технологических и теоретических рекомендаций по получению жидкостей,

содержащих частицы наноразмерного уровня, с заданными характеристиками методом импульсной лазерной абляции металлических материалов.

Работа выполнена в рамках задания 2.25 Государственной программы научных исследований «Физическое материаловедение, новые материалы и технологии».

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Кузьмин, П. Г. Физические процессы, определяющие свойства наночастиц, полученных при лазерной абляции твердых тел в жидкости: дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.04.21 / П.Г. Кузьмин; ИОФ им. А.М. Прохорова РАН. – Москва, 2015. – 144 с.

2. Пячин, С.А. Новые технологии получения функциональных наноматериалов: лазерная абляция, электроискровое воздействие / С.А. Пячин, М.А. Пугачевский // Хабаровск, 2013 – 38 с.

3. Сидоровнина, Т. Ю. Лазерная абляция металлов в жидкости. [Электронный ресурс] / Т.Ю. Сидоровнина, В.А. Тимошенко, А.Н. Савкин, Ю.В. Голубенко // Труды Всероссийской научно-технической конференции «Студенческая весна 2014: Машиностроительные технологии». – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана.

4. Гончаров, В.К. Формирование коллоидных растворов металлов в воде методом лазерной абляции / В.К. Гончаров, Козадаев, М.И. Маркевич, М.В. Пузырев, А.М. Чапланов // Актуальные проблемы физики твердого тела: сб. докл. Междунар. науч. конф., 20-23 окт. 2009 г., Минск. В 3 т. – Т. 3. редкол.: Н.М. Олехнович (пред.) [и др.]. – Минск: Изд. центр БГУ, 2009. – 406 с.

УДК 621.791.72

МИКРОТВЕРДОСТЬ И ЭЛЕМЕНТНЫЙ СОСТАВ НАПЛАВЛЕННЫХ ЛАЗЕРОМ ВАЛИКОВ ИЗ СПЛАВА ПГ-12Н-01

Девойно О.Г., Кардаполова М.А., Луцко Н.И., Лапковский А.С.

Белорусский национальный технический университет

г. Минск, Республика Беларусь

Лазерная наплавка – это технология создания покрытий из материалов разной природы на металлической подложке с использованием в качестве источника энергии лазерного луча [1-4]. Это гибкая технология, которая позволяет нанести покрытие из порошка подаваемого транспортирующим газом в ванну расплава, образуемую на поверхности основы лазерным лучом. Данная технология может использоваться как для упрочнения новых, так и для восстановления изношенных или поврежденных поверхностей. В противоположность традиционным методам наплавки зона теплового воздействия при лазерной наплавке ограничена несколькими миллиметрами, по этой причине зона термических напряжений также невелика, деформации минимальны, а механические характеристики основы практически не изменяются.

Исходя из вышесказанного, лазерная наплавка является весьма перспективным методом нанесения покрытий. Осуществление процесса лазерной наплавки предъявляет высокие требования к качеству покрытий, которое характеризуется такими параметрами как микроструктура, распределение микротвердости и состав покрытия.

В настоящей работе нами предпринята попытка исследовать фактическое распределение элементов и микротвердость в наплавленных покрытиях из самофлюсующегося сплава на основе никеля нанесенных лазерной наплавкой.

Для выполнения исследований использовали лазерный технологический комплекс, включавший газовый CO₂ - лазер непрерывного действия с мощностью излучения 1000 Вт и координатную систему, обеспечивавшую необходимое перемещение луча лазера относительно образцов. Наплавка покрытий производилась на образцы из стали 45 на различных режимах. В качестве наплавочного материала использовался порошок самофлюсующегося сплава на основе никеля – ПГ-12Н-01, с грануляцией 20–80 мкм.

Распределение элементов определяли на поперечных шлифах валиков с помощью рентгеновской дифракционной системы SmartLab RIGAKU (X-ray diffraction system). Измерение микротвердости производилось при помощи микротвердомера ПМТ-3 при нагрузке 100 г: в поперечном направлении – по линии симметрии валиков из основы к поверхности покрытия с шагом 0,05 мм; в продольном направлении - на уровне 0,1 мм выше основы, с таким же шагом.

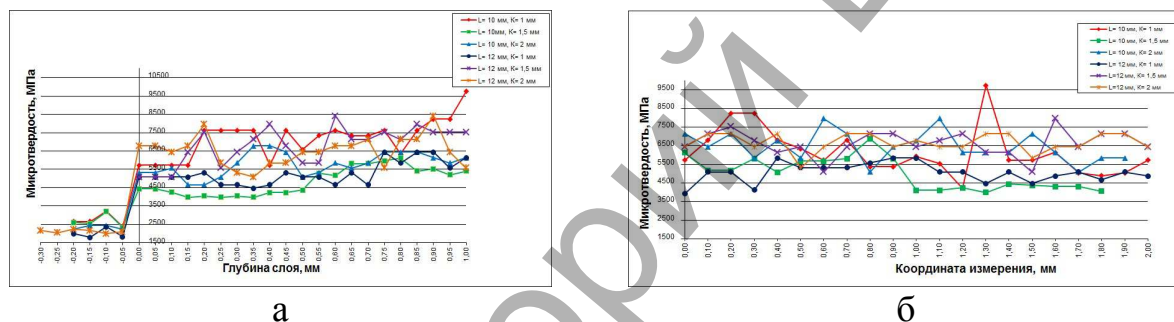


Рисунок 1 – Распределение микротвердости по глубине (а) и в продольном направлении покрытия (б) при скорости наплавки $V=80$ мм/мин

Из приведенных графиков распределения микротвердости в поперечном направлении (рисунок 1 а) и в продольном направлении покрытия (рисунок 1 б) хорошо видно, что она находится примерно на одном уровне по всей глубине и ширине покрытия для различных дистанций наплавки L и шагов наплавки K . Имеющиеся небольшие колебания микротвердости свидетельствуют о достаточно равномерном распределении фаз в покрытии, когда, из-за высокой скорости охлаждения ($10^3 - 10^5$ К/с), большинство упрочняющих элементов остаются в твердом растворе γ -Ni матрицы. Небольшие изменения микротвердости связаны скорее всего с супернасыщением этими элементами γ -матрицы, которое связано с повторными нагревами уже наплавленного валика при наплавке соседних валиков, когда в предшествующем валике могут выделяться некоторые интерметаллические фазы, особенно вблизи ванны расплава и в переходной зоне к твердой фазе.

Полученные данные по распределению элементов в различных точках поперечного сечения валиков при разных режимах лазерной наплавки свидетельствовали о том, что зависимости содержания элементов от режимов наплавки в исследованных пределах имеют линейный характер.

Поэтому для сокращения количества выполняемых экспериментов и получения наиболее достоверных данных использовалась методика полного факторного эксперимента (ПФЭ). Обработка данных экспериментов производилась при помощи специальной программы, составленной на основе редактора электронных таблиц Microsoft Excel 2010.

Эксперименты проводились по плану ПФЭ 2^2 , каждый эксперимент повторялся два раза. В качестве факторов влияющих на содержание элементов $y(Ni)$, $y(Fe)$, $y(Cr)$, $y(Si)$ (% вес.) были выбраны:

z_1 – скорость наплавки v (мм/мин), $z_{1min}= 40$, $z_{1max}= 120$;

z_2 – дистанция наплавки l (мм), $z_{2min}= 10$, $z_{2max}= 14$.

В результате были получены уравнения регрессии в натуральных переменных для содержания Ni, Fe, Cr, Si (% вес.):

$$y(Ni) = 21,25 - 0,269 \cdot v + 2,875 \cdot l;$$

$$y(Fe) = 71,75 + 0,431 \cdot v - 4,875 \cdot l;$$

$$y(Cr) = 4,35 - 0,06 \cdot v + 0,75 \cdot l;$$

$$y(Si) = 1,265 - 0,01545 \cdot v + 0,114 \cdot l.$$

Зависимости, построенные на основе приведенных уравнений, приведены на рисунке 2.

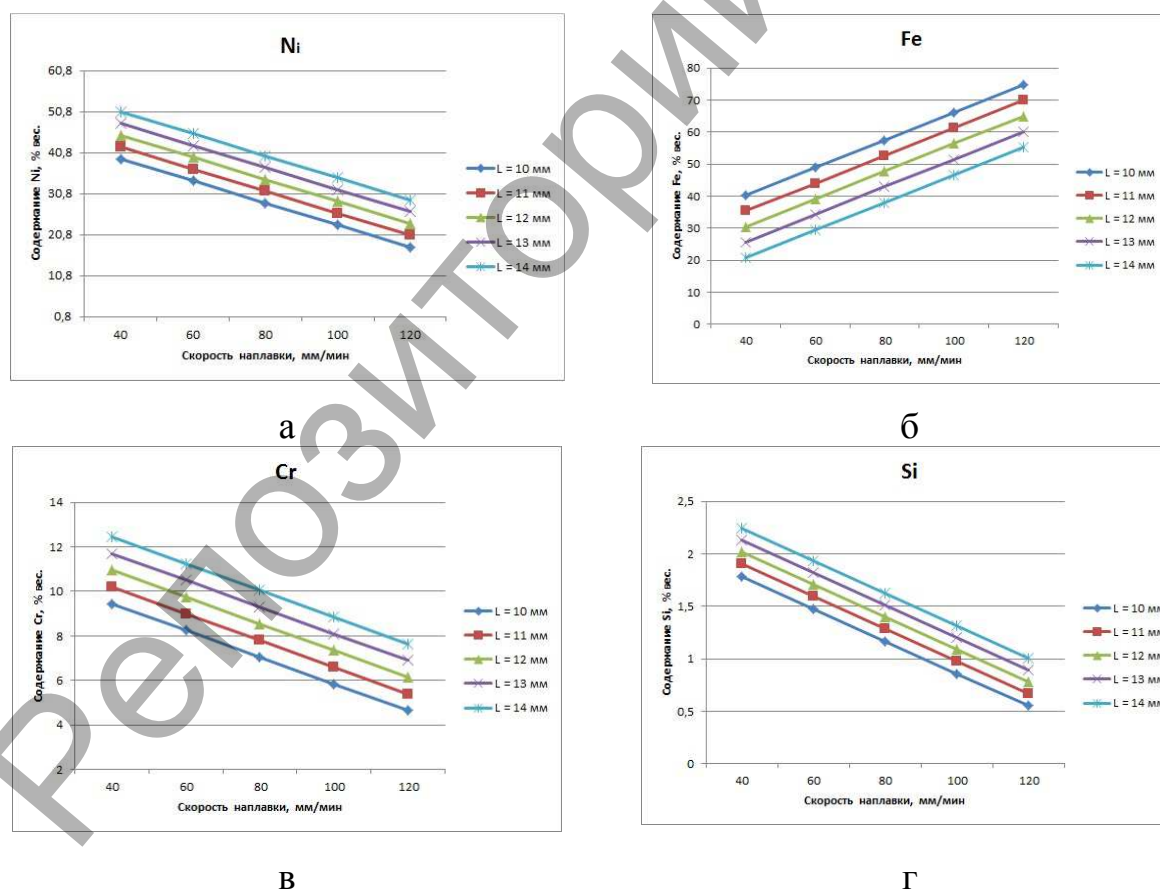


Рисунок 2 – Зависимости содержания Ni (а), Fe (б), Cr (в), Si (г) в % вес. в наплавленном слое из сплава ПГ-12Н-01 от скорости лазерной наплавки

Как видно из приведенных данных, наибольшее содержание никеля (рисунок 2 а), хрома (рисунок 2 в) и кремния (рисунок 2 г) в покрытии наблюдается

при дистанции наплавки $L = 14$ мм (фокус луча над поверхностью основы) в случае, когда имеет место минимальный переплав основы. Наименьшее содержание никеля, хрома и кремния в покрытии имеет место при дистанции наплавки $L = 10$ мм (фокус луча под поверхностью основы), что может свидетельствовать о сильном переплаве поверхности основы, когда часть этих элементов из покрытия переходит в последнюю. С увеличением скорости наплавки наблюдается уменьшение содержания никеля, хрома и кремния в покрытии

В процессе наплавки имеет место ожелезнение материала получаемого покрытия. При этом содержание железа в покрытии (рисунок 2 б) для всех зон валликов минимально при дистанции $L = 14$ мм (фокус луча над поверхностью основы), что хорошо согласуется с наименьшим переплавом основы в этом случае. Наибольшее же содержание железа в покрытии наблюдается при дистанции $L = 10$ мм (фокус под поверхностью основы), т.е. когда происходит наибольший переплав основы и взаимное перемешивание покрытия с основой. При этом степень переплава достаточно высока, т.к. содержание железа в покрытии может достигать 70% _{вес.}, в то время как содержание никеля падает до 20% _{вес.} (в исходном порошке содержание никеля составляет порядка 70% _{вес.}, а содержание железа – 3-4% _{вес.}). С увеличением скорости наплавки содержание железа в покрытии увеличивается.

Полученные данные о равномерном распределении микротвердости и содержания элементов в поперечном сечении покрытия при лазерной наплавке свидетельствуют о том, что при лазерной наплавке, когда поперечное сечение валика сопоставимо с диаметром лазерного пятна, происходит равномерный прогрев и перемешивание материала покрытия по всему его объему.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Lon, John C. Laser processing of Engineering Materials: principles, procedure and industrial application/ John C. Lon. – Burlington: Elsevier Butterworth-Heintmann, MA, 2005.
2. Steen, William M., Laser Material Processing, third Ed./ William M. Steen. – London: Springer, 2003.
3. Toyserkani, E. Laser Cladding/ E. Toyserkani, A. Khajepour, S. Corbin. - Boca Raton, Florida: CRS Press, 2005.
4. De Hosson, J. Th. M. Functionally graded materials produced with high power lasers/ J. Th. M. De Hosson, V. Ocelic// Proceeding of ASTRA – 2003. - Hyderabad, India, 2003. P. 368-376.

УДК 669.716.621.785

ГОМОГЕНИЗАЦИЯ АЛЮМИНИЕВЫХ СЛИТКОВ, ПРОЦЕССЫ, ПРОИСХОДЯЩИЕ В МЕТАЛЛЕ, ОПТИМАЛЬНЫЕ РЕЖИМЫ ГОМОГЕНИЗАЦИИ

Капленко В. С.

Физико-технический институт НАН Беларуси
Минск, Республика Беларусь

Целью данной работы является оптимизация режимов термической обработки алюминиевых слитков марок АД31, АД33, т.е. определение температуры и минимальной продолжительности времени выдержки при гомогенизационном

отжиге, обеспечивающем благоприятную макро- и микроструктуру для обработки металла давлением.

В условиях жесткой конкуренции между производителями остро стоит вопрос повышения производительности получения прессованных профилей за счёт уменьшения технологического цикла. В процессе производства слитков из

сплавов системы Al-Mg-Si важную роль играет операция гомогенизации. Этот

вид термической обработки литого материала используется для устранения неоднородностей структуры, связанных с неравновесными условиями затвердевания слитка при непрерывном литье. В литом состоянии границы зерна и дендритных ячеек обогащены магнием и кремнием. Если в средней части дендритной ячейки химический состав примерно постоянен, то вблизи границ концентрация этих элементов резко возрастает [1].

Следует отметить, что при исследовании микроструктуры в этих же местах наблюдаются частицы фазы Mg_2Si темного цвета и светло серые частицы железосодержащей фазы β (Al_5FeSi) пластинчатой формы, выделившиеся в процессе кристаллизации и последующего охлаждения. Часто встречаются светло серые частицы α (Al_8Fe_2Si) шрифтообразной формы и др., появление которых обусловлено ограниченной растворимостью железа в твердом растворе и условиями кристаллизации [1].

В результате границы дендритных ячеек и зерен, оказываются окаймленными выделениями фаз, что охрупчивает сплав, повышает сопротивление дефор-

мации и снижает температуру начала образования трещин из-за недостаточной

пластичности металла. Поэтому прессование такой заготовки затруднено и возникает необходимость в отжиге слитка при определенных условиях, под действием которой усредняется химический состав по всему объему зерна, а также видоизменяются частицы железосодержащих фаз. Все это способствует улучшению технологичности сплава при прессовании, которое выражается в снижении сопротивления деформации, возможности производства тонкостенных профилей сложной формы, повышении уровня механических свойств, улучшении качества поверхности профилей и увеличении выхода годного [1].

Термическая обработка слитка сопровождается протеканием следующих процессов:

- Растворение фазы Mg_2Si и выравнивание концентрации магния и кремния в объеме зерна.
- Трансформация железосодержащих фаз.
- Распад пересыщенного твердого раствора переходных металлов.

- Выделение фазы Mg_2Si при охлаждении гомогенизированных слитков [2].

Режимы осуществления гомогенизационного отжига отличаются у разных производителей и проводятся при температурах 540-580 °С в течение 4-10 часов. Согласно ранее проведенным исследованиям, доказано, что для сплава АД31 имеется принципиальная возможность повышения температуры отжига до 600-620 °С, при этом существенно сокращается время гомогенизации и не наступает пережога металла [1].

Кинетика растворения эвтектической фазы Mg_2Si была изучена в процессе закалки при температурах 560-600 °С - выдержке в течение 3-60 мин, охлаждении в воду и последующего искусственного старения при температуре 160 °С в течение 4 ч. После проведения такой термообработки по уровню повышения твёрдости можно проследить, сколько времени необходимо для растворения Mg_2Si кристаллизационного происхождения. На рисунке 1 приведены результаты измерения твёрдости образцов в зависимости от времени выдержки при закалке [1].

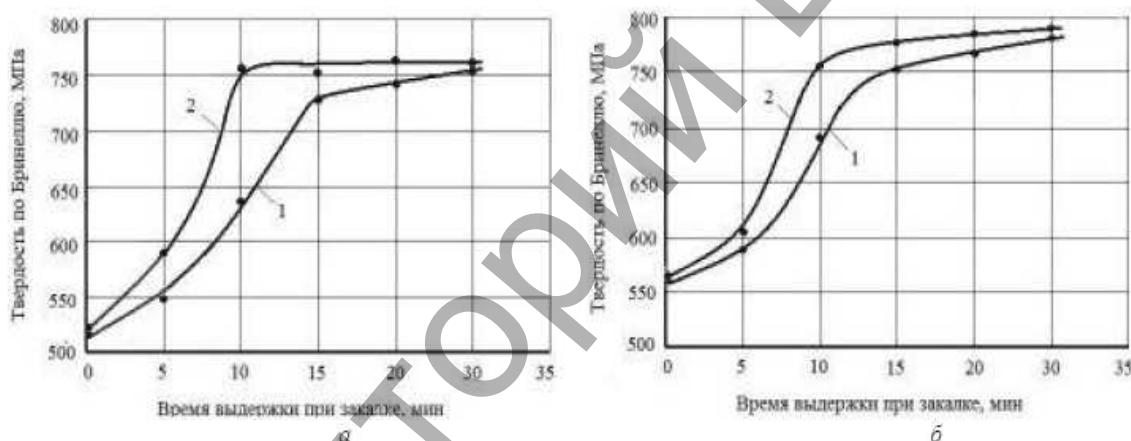


Рисунок 1 – Зависимости состаренных образцов алюминиевых сплавов АД31 (а) и АД33 (б) от времени выдержки при закалке с температуры 560°С и 600°С [1]

Кривые изменения твёрдости образцов сплавов АД31 и АД33 носят схожий характер: с увеличением времени выдержки при закалке до 10-15 мин твёрдость сплавов достигает максимума и составляет примерно 730-770 МПа, а дальнейшее увеличение выдержки не приводит к заметному ее увеличению. Данное обстоятельство свидетельствует, что для растворения фазы Mg_2Si в сплавах АД31 и АД33 требуется, соответственно, примерно 10 мин при 600 °С и около 15 мин при 560 °С [1].

С целью изучения трансформации железистых фаз была исследована микроструктура образцов из сплава АД31 в литом состоянии, а также после отжигов при температурах 560 и 600 °С в течение 30-240 мин. Согласно ранее проведенным исследованиям, идентификация фаз $\alpha-Al_8Fe_2Si$ и $\beta-Al_5FeSi$ по окраске при травлении в различных реактивах невозможна, поэтому их идентифициру-

ют только по морфологии: фаза α близкая к равновесной, а фаза β - иглообразной формы, вытянутая [1].

Выявлено, что после отжига при 560 °С в течение 30-60 мин в отдельных полях зрения присутствуют единичные включения Mg_2Si , отмечается лишь некоторая фрагментация частиц фазы α , а количество иглообразных частиц фазы β уменьшается незначительно по сравнению с литым состоянием. Однако после выдержки в течение 240 мин в структуре образцов существенно снижается количество вытянутых игольчатых частиц, прошла сфероидизация железистых фаз. Отжиг при повышенной температуре 600 °С приводит к ускорению диффузионных процессов, более полной трансформации железистых фаз, и даже при выдержке 90 мин в структуре почти полностью отсутствует вытянутая игольчатая фаза (рисунок 2) [1].

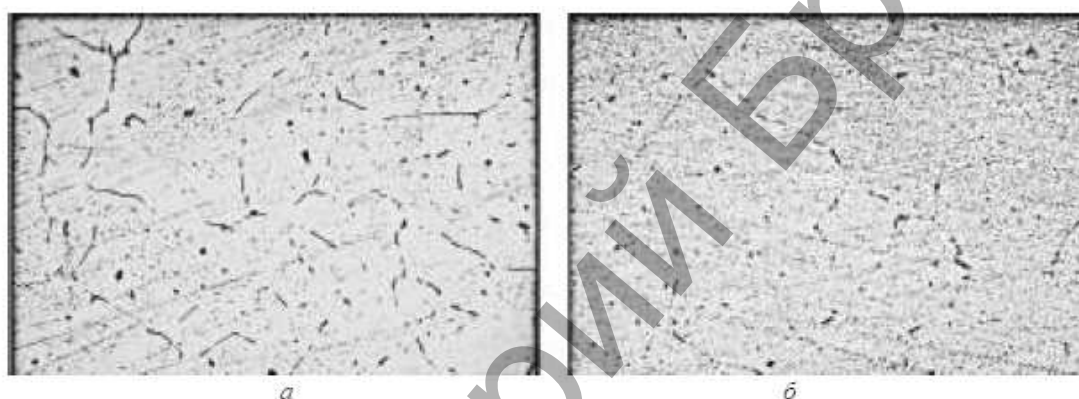


Рисунок 2 – Микроструктура слитка сплава АД31 в литом состоянии (а) и после отжига при 600 °С в течение 90 мин (б) (x500) [1]

В ходе проделанной работы, ссылаясь на теоретические данные, можно сделать вывод о том, какой режим гомогенизации алюминиевых слитков является оптимальным. Данные представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Итоговые данные по выбору оптимального режима гомогенизации алюминиевых слитков для сплавов АД31, АД33.

Режимы гомогенизации	Время нагрева, ч.	Время выдержки, ч.	Время охлаждения, ч.	Температура нагрева, °С
Действующий режим на СООО «АлюминТехно» (РБ)	5	5	5	570-585
Оптимальный режим	5	1,5	4 (охлаждение в воде)	600

Таким образом, можно сделать вывод о целесообразности повышения температуры гомогенизационного отжига исследованных слитков до температуры 600 °С, при этом длительность выдержки термообработки можно сократить до

90 мин, что позволит обеспечить благоприятную макро- и микроструктуру для обработки металлов давлением.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Макаров Г.С. Основы производства слитков из алюминиевых сплавов, легированных магнием и кремнием, Москва 2010г.

2. Седов Э.В; Бондарева О.П; Палаткина Л.В; Тарасов И.С. Оптимизация режимов гомогенизации слитков из алюминиевых деформируемых сплавов [Электронный ресурс]. Тип: статья в журнале – научная статья; том: 9; номер: 9; год: 2014; страницы 145-148. URL: <http://elibrary.ru/item.asp?id=21947682>.

УДК 621.762

ИНДУКЦИОННАЯ НАПЛАВКА ДИФфуЗИОННО-ЛЕГИРОВАННЫХ СПЛАВОВ ИЗ МЕТАЛЛООТХОДОВ ПРОИЗВОДСТВА

Щербаков В.Г.

Белорусский национальный технический университет,
Минск, Республика Беларусь.

Более 25 лет ведутся научные исследования, связанные с применением металлических отходов производства в качестве основы для получения диффузионно-легированных (ДЛ) сплавов [1-3]. ДЛ сплавы находят широкое применение в современной промышленности. При получении защитного покрытия (ЗП) из ДЛ сплавов все внимание уделяется, в основном, только высокотемпературным способам его нанесения (лазерной, плазменной, электродуговой, электроискровой, наплавкой, электроискровым упрочнением, напылением, наплавкой наплавочными электродами и др.). Металлические отходы на железной основе при получении ДЛ сплавов для индукционной наплавки ЗП используются значительно реже.

При упрочнении и восстановлении деталей индукционной наплавкой, чаще всего, используют наплавочные порошки типа сормайт и ФБХ-6-2, сплавы на основе кобальта, вольфрама и никеля и др. Получение ЗП из данных материалов не всегда является экономически и технологически целесообразным, так как эксплуатационные свойства получаемых ЗП часто имеют завышенные значения. Стоит отметить, что основными недостатками данных сплавов являются их высокая цена и температура плавления. Таким образом, для формирования ЗП на неответственных деталях простой геометрической формы, работающих в условиях интенсивного абразивного изнашивания, рекомендуется использовать дешевые диффузионно-легированные сплавы, полученные из металлических отходов металлургического производства [1-5].

Цель данной работы состояла в исследовании диффузионного легирования металлических отходов производства в виде чугунной стружки из конструкционной стали и изучение защитных покрытий из данных материалов, полученных наплавкой токами высокой частоты.

В качестве исходного материала использовались металлические отходы в виде стружки из конструкционной стали SUJ2 (Япония, аналог ШХ15, ГОСТ 801-78). Диффузионное легирование (насыщение бором) проводили во вра-

шающейся электрической печи. Индукционная наплавка осуществлялась на высокочастотном генераторе ВЧГ2–100/0,066 мощностью 100 кВт, число фаз – 3, частота 66 кГц. Параметры режима наплавки: накал – 13 В, ток на сетке – 1,5 А, анод – 7,5 А, анодное напряжение – 10 кВ. Толщину боридных слоев на диффузионно-легированных металлических отходах дроби и стружки, а также особенности структуры и морфологию исследовали с помощью металлографических микроскопов МИ-1 и Planar 1M. Микродюрометрические исследования проводили на приборе ПМТ-3 согласно ГОСТ 2999-75. Испытания образцов на абразивное изнашивание проводили в среде незакрепленного абразива (речной песок фракцией 315 – 630 мкм) в специально созданной установке на базе лабораторных бегунов.

На рисунке 1 представлен внешний вид и микроструктура после ДЛ металлических отходов производства в виде чугунной стружки SUJ2. После диффузионного легирования в подвижной порошковой смеси на стружке SUJ2 образовался диффузионный слой, состоящий из FeB и Fe₂B.



а – внешний вид исходной стружки SUJ2;
б – микроструктура диффузионно-легированной стружки

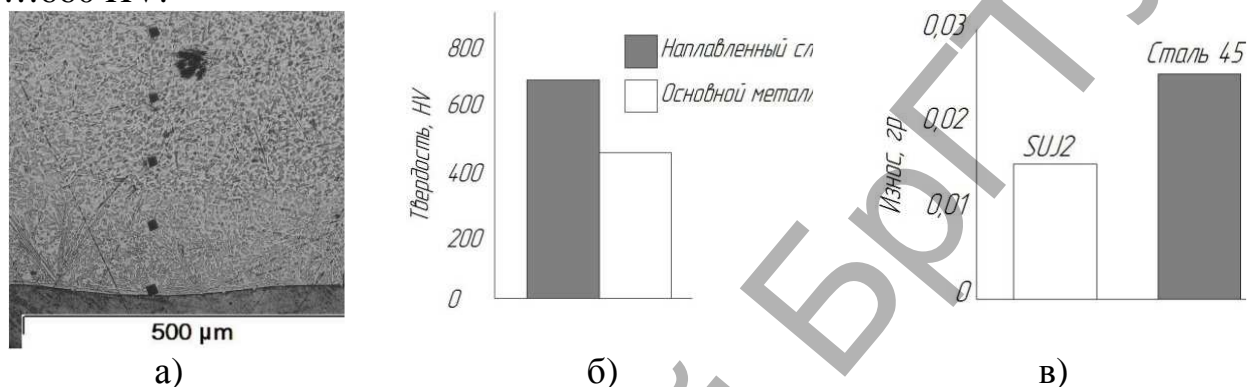
Рисунок 1 – Внешний вид и микроструктура диффузионно-легированных отходов производства

В сердцевине стружки сохранилась исходная металлическая основа с незначительным повышением концентрации углерода и легирующих элементов, за счет роста диффузионного слоя от поверхности к центру материала. Микротвердость диффузионно-легированной стружки в подвижной порошковой смеси на поверхности составляет 11000–13000 МПа и плавно снижается к сердцевине до 4000–5000 МПа. Толщина диффузионного слоя составляет 60–70 мкм.

Полученная микроструктура из ДЛ сплава на основе стружки SUJ2 представлена на рисунке 2. Твердость (Рисунок 2, б) покрытия из диффузионно-легированной стружки SUJ2 составляет 640...660 НV. Данная твердость обусловлена наличием в наплавленной структуре боридов железа и бороцементита. Износостойкость покрытия (Рисунок 3, в) полученного с помощью индукцион-

ной наплавки в 2,5–3 раза выше, чем у стали 45, подвергнутой закалке в воде с последующим низким отпуском.

Проведенные исследования подтвердили перспективность технологии диффузионного легирования металлоотходов широкого спектра в подвижных порошковых средах. Данная технология позволяет использовать в качестве основы при получении диффузионно-легированных сплавов металлические отходы производства в виде дроби и стружки. Твердость защитных покрытий из диффузионно-легированных сплавов на основе стружки SUJ2 составляет и 640...660 HV.



- а – микроструктура износостойкого покрытия;
 б – твердость покрытия и основы после наплавки ТВЧ;
 в – интенсивность износа покрытия из ДЛ сплава

Рисунок 2 – Микроструктура, твердость и износостойкость покрытия из ДЛ стружки SUJ2

Средняя интенсивность изнашивания защитных покрытий, работающих в условиях интенсивного абразивного изнашивания из диффузионно-легированной стружки SUJ2 в 2,5–3 раза ниже, чем у стали 45 подвергнутой предварительно закалке с низким отпуском.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Пантелеенко, Ф.И. Самофлюсующиеся диффузионно-легированные порошки на железной основе и защитные покрытия на них / Ф.И. Пантелеенко. – Мн.: УП «Технопринт», 2001. – 300 с.
2. Константинов, В.М. Диффузионно-легированные сплавы для защитных покрытий: дис. ... д-ра техн. наук: 05.02.01 / В.М. Константинов. – Минск, 2008. – 475 л.
3. Ворошнин, Л.Г. Теория и практика получения защитных покрытий с помощью ХТО / Л.Г. Ворошнин, Ф.И. Пантелеенко, В.М. Константинов. – 2-е изд., перераб. и доп. – Минск: ФТИ; Новополоцк: ПГУ, 2001. – 148 с.
4. Щербаков, В. Г. Некоторые аспекты использования отходов металлургического производства в качестве основы для получения наплавочных материалов / В. Г. Щербаков // Металлургия : республиканский межведомственный сборник научных трудов. – Минск : БНТУ, 2011. – Вып. 33, ч. 2. - С. 200-213.
5. Щербаков, В.Г. Получение диффузионно-легированных сплавов в подвижных порошковых средах из металлических отходов производства для индукционной наплавки и пути повышения их технологических свойств / В.Г. Щербаков // Литейные процессы. – 2014. – №13. – С. 90–98.

ОСЕСИММЕТРИЧНОЕ ТЕРМОСИЛОВОЕ ДЕФОРМИРОВАНИЕ КОРОТКИХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ТЕЛ ПРИ НЕЙТРОННОМ ОБЛУЧЕНИИ

В.М. Хвиевич, А.И. Веремейчик, В.В. Гарбачевский
Брестский государственный технический университет,
Брест, Республика Беларусь

Воздействие температурного поля при одновременном интенсивном облучении высокоэнергетическими частицами приводит к появлению деформаций термического расширения и окружных деформаций радиационного распухания. При этом появляются значительные напряжения, которые могут привести к разрушению нагруженного тела. Это требует разработки новых методов расчета конструктивных элементов, подверженных воздействию одновременной терморadiационной и механической нагрузки.

Объектом рассмотрения является сплошной короткий однородный цилиндр радиусом R и высотой H , который подвергается воздействию радиационной, температурной нагрузки и внешнего радиального и осевого давления.

В связи со спецификой заданных нагрузок и с учетом физической и геометрической симметрии напряженно-деформированного состояния (НДС) короткого цилиндра можно оценить, реализовав осесимметричную задачу теории упругости с учетом теплового и радиационного воздействия. Задача рассматривается в несвязанной постановке.

Дифференциальные уравнения (ДУ) равновесия имеют вид:

$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} = 0, \\ \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\tau_{rz}}{r} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial r} = 0, \end{cases} \quad (1)$$

где $\sigma_r, \sigma_\theta, \sigma_z$ - радиальное, окружное и осевое напряжение, r - переменный радиус.

Граничные условия задачи:

$$\text{при } r = 0: u_r = 0, \frac{\partial u_z}{\partial r} = 0, \quad \text{при } r = R: \sigma_r = -P_1, \tau_{rz} = 0,$$

$$\text{при } z = 0: u_z = 0, \tau_{rz} = 0, \quad \text{при } z = H: \sigma_z = -P_2, \tau_{rz} = 0,$$

где P_1, P_2 - внешнее давление на боковой и торцевой поверхности соответственно.

Эмпирическая функция радиационного распухания, являющаяся функцией времени и температуры, принимается согласно [1]:

$$S(T(r), t) = 4,9 \cdot 10^{-51} \cdot (\Phi \cdot t)^{1,71} \cdot 10^{\frac{15490}{T} - \frac{5,98 \cdot 10^6}{T^2}}, \quad (2)$$

где t - время, Φ - нейтронный поток, T - температурное поле как функция координат:

$$T(r, z) = T_s + \frac{q_v}{4\lambda} (R^2 - r^2), \quad (3)$$

T_s - температура на наружной поверхности, q_v - объемное тепловыделение, являющееся функцией координаты z , λ - коэффициент теплопроводности материала, $q_v = \bar{q}_v \cdot K_z \cdot \cos\left(\frac{\pi H}{H + 2H_0} \cdot \frac{z}{H}\right)$, где $\bar{q}_v = 2,234 \cdot 10^8 \frac{Вт}{м \cdot град}$ - внутренний объемный источник тепловыделения, $T_s = 700^0 C$.

С учетом характеристик для материала ОХ16Н15М3Б [1] принимаем: $K_z = 1,2$, $\Phi = 2,81 \cdot 10^{19}$ нейтр./ $(см^2 \cdot ч)$, $\alpha = 16 \cdot 10^{-6}$ град $^{-1}$, $\nu = 0,3$, $E = 1,5 \cdot 10^{11}$ Па, $\lambda = 12$ Вт/ (м·град) [1]. Размеры цилиндра: $H=40$ мм, $R= 5$ мм. Поверхности температурного поля и радиационного распухания для момента времени 1000 ч. приведены на рисунке 1.

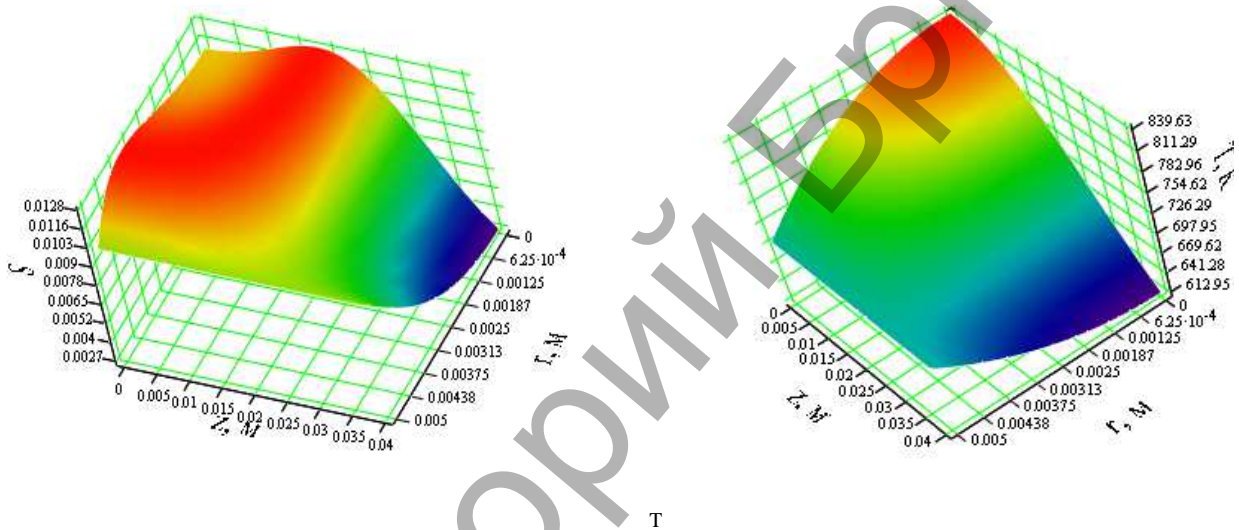


Рисунок 1 – Поверхности температуры и радиационного распухания в момент времени 1000 часов

Уравнения обобщенного закона Гука при механическом, температурном и радиационном нагружении:

$$\begin{aligned}
 \epsilon_r &= \frac{1}{E}(\sigma_r - \nu(\sigma_\theta + \sigma_z)) + \alpha \cdot T(r, z) + \frac{S(r, z)}{3}, \\
 \epsilon_\theta &= \frac{1}{E}(\sigma_\theta - \nu(\sigma_r + \sigma_z)) + \alpha \cdot T(r, z) + \frac{S(r, z)}{3}, \\
 \epsilon_z &= \frac{1}{E}(\sigma_z - \nu(\sigma_\theta + \sigma_r)) + \alpha \cdot T(r, z) + \frac{S(r, z)}{3}, \\
 \gamma_{rz} &= \frac{\tau_{rz}}{G},
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

где α – коэффициент линейного расширения материала, $G = \frac{E}{2(1+\nu)}$ - модуль сдвига.

Геометрические соотношения Коши, связывающие перемещения и деформации, следующие:

$$\varepsilon_r = \frac{\partial u_r}{\partial r}, \quad \varepsilon_\theta = \frac{u_r}{r}, \quad \varepsilon_z = \frac{\partial u_z}{\partial z}, \quad \gamma_{rz} = \frac{\partial u_r}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial r} \quad (5)$$

Выразив компоненты напряжений рассматриваемой задачи через перемещения u_r, u_z , и решая совместно (4) и (5), получены выражения для напряжений. С учетом этих выражений ДУ равновесия запишем в виде системы равновесия второго порядка в перемещениях:

$$\begin{aligned} & E \frac{1-\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)} \frac{\partial^2 u_r}{\partial r^2} + E \frac{\nu}{2(1-2\nu)(1+\nu)} \frac{\partial^2 u_z}{\partial r \partial z} - E \frac{1-\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)} \frac{1}{r} \frac{\partial u_r}{\partial r} - \\ & - E \frac{1-\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)} \frac{u_r}{r^2} + \frac{E}{2(1+\nu)} \frac{\partial^2 u_r}{\partial z^2} - \frac{1}{1-2\nu} E \alpha \cdot \frac{\partial T}{\partial r} - \frac{1}{1-2\nu} E \cdot \frac{\partial S}{\partial r} = 0, \\ & E \frac{(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2} + E \frac{\nu}{2(1+\nu)(1-2\nu)} \frac{\partial^2 u_r}{\partial z \partial r} + \frac{\nu}{2(1-2\nu)} \frac{E}{1+\nu} \frac{1}{r} \frac{\partial u_r}{\partial z} + \\ & + \frac{E}{2(1+\nu)} \frac{1}{r} \frac{\partial u_z}{\partial r} + \frac{E}{2(1+\nu)} \frac{\partial^2 u_z}{\partial r^2} - \frac{1}{(1-2\nu)} E \alpha \cdot \frac{\partial T}{\partial z} - \frac{1}{(1-2\nu)} E \cdot \frac{1}{3} \frac{\partial S}{\partial z} = 0. \end{aligned} \quad (6)$$

Решение такой системы ДУ второго порядка в частных производных возможно только численным путем. Для ее решения воспользуемся методом конечных разностей (МКР), позволяющим перейти от систем ДУ к их аналогам – системе алгебраических уравнений с неизвестными значениями перемещений u_r, u_z в контурных и внутриконтурных точках, применив пошаговое разбиение по времени и составив конечно-разностные уравнения для каждого из временных шагов. Составлена система конечно-разностных аналогов уравнений (6) для внутренних точек области. Получены выражения осевых и радиальных перемещений для контурных точек области в конечных разностях с использованием граничных условий. Расчет контурных значений неизвестных перемещений проводится через контурные и внутриконтурные точки, что позволило снизить объем вычислительных операций и позволило снизить шаг сетки, повысив точность результатов.

Решение системы уравнений, включающей неизвестные значения перемещений u_r, u_z в контурных и внутриконтурных точках, проводится в среде Mathcad 15. Для этого разработана соответствующая программа, позволяющая получать численное решение системы ДУ (6) с граничными условиями. Программа предоставляет возможность пользователю варьировать не только характеристиками материала и внешними воздействиями, но и шагом сетки и граничными условиями, что значительно расширяет возможности исследователю.

Получены значения компонент напряжения $\sigma_r, \sigma_\theta, \sigma_z$ и деформаций $\varepsilon_r, \varepsilon_\theta, \varepsilon_z, \gamma_{rz}$ в зависимости от координат r и z . Исследована их зависимость от времени облучения и свойств материала. Кроме того, проведено исследование влияния температуры и радиационного нагружения на напряжения, деформации и перемещения.

Проведено решение некоторых тестовых задач. Достоверность результатов,

ввиду отсутствия аналитических решений такого рода задач, проверялась при отдельном механическом и температурном нагружении. Сравнение результатов с аналитическим решением задач теории упругости и теплопроводности [2, 3] подтвердило достоверность конечно-разностных схем.

Полученные результаты могут быть использованы при разработке и создании новых конструкций, а также позволяют оптимизировать форму и размеры существующих конструктивных элементов при температурных, силовых и радиационных воздействиях.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Куликов, И.С., и др. Прочность тепловыделяющих элементов быстрых газоохлаждаемых реакторов / И.С. Куликов, Б.Е. Тверковкин. – Мн., 1984. – 143 с.
2. Тимошенко, С.П., и др. Теория упругости / С.П. Тимошенко, Дж. Гудьер. – М., 1979. – 576 с.
3. Коваленко, А.Д. Основы термоупругости / А.Д. Коваленко. - Киев: Наукова думка, 1970. – 239 с.

УДК 621.794.61

НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ZrCN:DLC ПОКРЫТИЯ

Онысько С.Р.¹, Хвиевич В.М.¹, Чекан Н.М.², Акула И.П.²

- 1) Брестский государственный технический университет,
Брест, Республика Беларусь;
- 2) Физико-технический институт НАН Беларуси,
Минск, Республика Беларусь

Износостойкие покрытия стали неотъемлемым атрибутом современных металло- и деревообрабатывающих инструментов. Если до недавнего времени основным типом покрытия был нитрид титана, который использовался как универсальное покрытие для различных инструментов и условий обработки, то на сегодняшний день предпочтение отдается более специализированным покрытиям.

Авторами настоящей работы создан новый тип композиционных покрытий на основе нанокристаллического карбонитрида циркония и аморфного алмазоподобного углерода ZrCN:DLC [1]. В силу ряда особенностей роста твердых и сверхтвердых покрытий PVD методом, а также сильного различия температурных коэффициентов линейного расширения покрытия и основы, на которую оно наносится, в формируемом тонкопленочном материале возникают сильные внутренние напряжения, достигающие нескольких гигапаскалей.

Детальное описание метода получения ZrCN:DLC покрытия приводится в работе [2]. Покрытия осаждались на полированные пластины из инструментальной стали X12M и твердого сплава BK10.

Характер взаимодействия тонких пленок и покрытий с основой всецело определяет напряжения первого типа в такого рода системах. Отсутствие каких-либо сил в направлении нормали к основе и возможности свободной деформации в этом направлении позволяет рассматривать покрытие как двuosную напряженную систему. Для произвольно ориентированного кристаллита, развер-

нутого в плоскости покрытия на угол ϕ и отклоненного от вертикали (нормали к плоскости основы) на угол Ψ , величина относительной деформации определяется выражением [3]:

$$\frac{d - d_0}{d_0} = \frac{1 + \nu}{E} \sin^2 \psi (\sigma_x \cos^2 \phi + \sigma_y \sin^2 \phi) - \frac{\nu}{E} (\sigma_x + \sigma_y), \quad (1)$$

где d_0 – межплоскостное расстояние для недеформированного кристаллита, E и ν модуль Юнга и коэффициент Пуассона соответственно.

В условиях получения экспериментальных образцов покрытий использовались поликристаллические плоскопараллельные пластинки из стали и твердого сплава, расположенные перпендикулярно потоку плазмы. В таком случае можно предположить равенство напряжений, действующих вдоль осей x и y , что приводит к существенному упрощению выражения (1):

$$\frac{d - d_0}{d_0} = \frac{1 + \nu}{E} \sigma \sin^2 \psi - \sigma \frac{2\nu}{E}. \quad (2)$$

Из (2) следует, что при равновеликих напряжениях вдоль двух указанных направлений исчезает зависимость от азимутального угла в положении кристаллитов относительно плоскости покрытия.

Величина межплоскостных расстояний однозначно связана с положением пика брегговской дифракции

$$2d \sin \theta = \lambda n, \quad (3)$$

где λ – длина волны рентгеновского излучения, n – порядок дифракции.

На рисунке 1 показаны совмещенные дифрактограммы при $\Psi=0$ от образцов покрытий, полученных на основе стали и твердого сплава. На рисунке также присутствуют дифрактограммы для поликристаллического карбонитрида циркония стехиометрического состава $ZrC_{0,5}N_{0,5}$ [4], используемые в данном случае в качестве образца-сравнения.

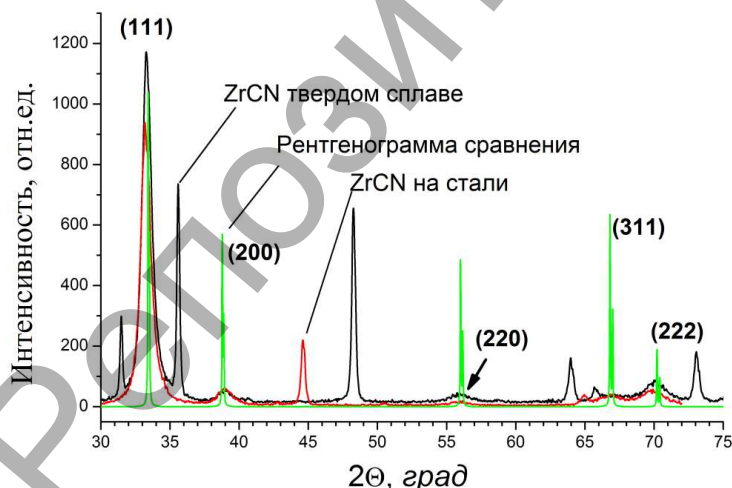


Рисунок 1 – Рентгенограммы покрытия ZrCN:DLC

Степень текстурирования покрытий η можно оценить по отношению интенсивности пика I_{111} к суммарной интенсивности всех учитываемых N пиков:

$$\eta = \left(\frac{Nr_{111}I_{111}}{\sum_{hkl} r_{hkl}I_{hkl}} - 1 \right) / (N - 1), \quad (4)$$

где r - относительная интенсивность пиков поликристаллического нетекстурированного покрытия.

Рассчитанные значения относительной интенсивности пиков поликристаллического нетекстурированного покрытия составляют следующие значения $r_{111}=1$, $r_{200}=1,85$, $r_{220}=2,08$, $r_{311}=1,61$ и $r_{222}=5,26$.

С учетом этих коэффициентов и значений интенсивностей пиков, полученных от экспериментальных образцов покрытий, расчет по формуле (4) дает $\eta=49\%$ для покрытия на твердом сплаве и $\eta=56\%$ для покрытий на стали. Это означает, что из всех имеющихся кристаллитов в покрытии приблизительно половина расположена так, что плоскость (111) направлена параллельно поверхности основы.

При исследовании деформации кристаллической решетки покрытия и связанного с ней напряжения необходимо максимально увеличить диапазон изменений угла Ψ для корректного выполнения указанного выше построения Преви и повышения точности определяемых величин.

На рисунке 2 приведены графики зависимости межплоскостного расстояния d_{220} от $\sin^2 \Psi$ для композиционного покрытия карбонитрида циркония и алмазоподобного углерода нанесенного на сталь и твердый сплав. Экспериментальные данные достаточно хорошо аппроксимируются линейной зависимостью и подтверждают корректность рассмотренной модели двусосных напряжений, несмотря на то, что текстурированное покрытие не является изотропным континуумом, в приближении которого были выведены соотношения (1) и (2).

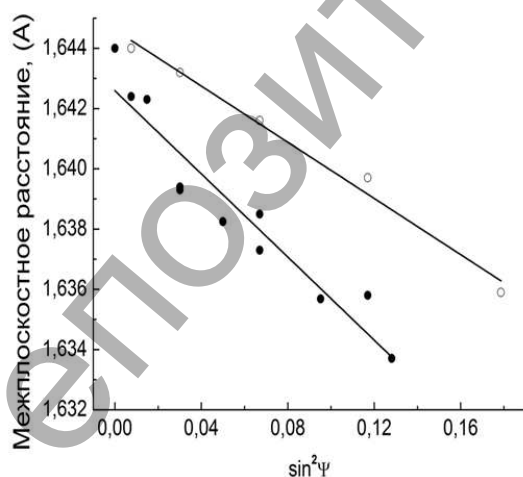


Рисунок 2 – Зависимость межплоскостного расстояния

Получаемый из графика коэффициент k линейной зависимости d от $\sin^2 \Psi$ позволяет рассчитать уровень напряжений в покрытии. Из (2) имеем:

$$d = k \sin^2 \psi + d_0(1 - 2\nu\sigma / E), \quad (4)$$

$$k = d_0\sigma(1 + \nu) / E \Rightarrow \sigma = \frac{kE}{d_0(1 + \nu)} \quad (5)$$

График рассматриваемой линейной функции пересекает ось ординат в точке:
 $d(0) = d_0(1 - 2\nu\sigma / E)$ (6)

Комбинируя (5) и (6) получаем выражение для расчета напряжений:

$$\sigma = \frac{kE}{d(0)(1 + \nu) + 2\nu k} \quad (7)$$

Рассчитанные напряжения в покрытии составили -6,9 ГПа и -9,9 ГПа для покрытия на стали и покрытия на твердом сплаве соответственно.

Полученные результаты показывают очень высокий уровень остаточных напряжений, и это требует особо тщательной подготовки поверхности основы для обеспечения достаточно сильной адгезии покрытия во избежание его отслаивания от основы.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Н.М. Чекан, С.Р. Онысько, В.В. Акулич, И.П. Акула, Е.В. Ладутько, Н.В. Логуновская. Упрочняющие градиентные покрытия на основе карбонитридов циркония для штамповой оснастки. / Современные методы и технологии создания и обработки материалов. Материалы IV Международной научно-технической конференции. 19-21 октября 2009г., Минск, Беларусь // Минск: ФТИ НАН Беларуси, 2009, книга 3, С. 185-190.

2. Н.М. Чекан, И.П. Акула, И.Б. Василевич, В.М. Хвисевич, С.Р. Онысько. Износостойкие нанокристаллические покрытия для штамповой оснастки. / Современные методы и технологии создания и обработки материалов. Материалы IX Международной научно-технической конференции. 16-18 сентября 2014г., Минск, Беларусь // Минск: ФТИ НАН Беларуси, 2014, т. 2, С. 6-16.

3. P.S. Prevey. X-ray Diffraction Residual Stress Techniques, Metals Handbook. 10. Metals Park: American Society for Metals, 1986, 380-392.

4. V.V. Kosukhin, V.F. Funke, V.I. Minashkin, V.S. Smirnov, Y.P. Efremov. Zirconium nitride and carbonitrides coatings obtained by the chemical vapor deposition (CVD) method / INOMAF 1987, Vol. 23, P. 52-56.

УДК 539.3

К РЕШЕНИЮ ПЛОСКИХ КРАЕВЫХ ЗАДАЧ ТЕРМОУПРУГОСТИ НЕОДНОРОДНЫХ ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ ТЕЛ МЕТОДОМ ПОТЕНЦИАЛА

Хвисевич В.М., Гарбачевский В.В., Веремейчик А.И.

Брестский государственный технический университет,
Брест, Республика Беларусь

Как известно, при создании элементов механизмов, машин первостепенным требованием является снижение их материалоемкости при одновременном обеспечении прочностных и жесткостных характеристик. Для решения такой проблемы важным обстоятельством является создание эффективных методов исследования НДС (напряженно-деформированного состояния) элементов, которые в реальных условиях подвергаются воздействию механических усилий и температурных полей. Часто рассматриваемые элементы представляют собой тела вращения.

При действии на тела высоких температур изменение температуры T приводит к существенному изменению модуля Юнга $E = E(T)$, коэффициента линейного расширения $\alpha = \alpha(T)$ при постоянном коэффициенте Пуассона ν [1].

В работе [2] показано, что максимальные напряжения в нагретой толсто-стенной трубе с учетом изменения модуля Юнга от температуры на 40% меньше, чем при постоянном модуле. Поэтому постановка и реализация такого рода задач актуальна и имеет практическую ценность.

Для исследования НДС в осесимметричных телах с непрерывной неоднородностью необходимо поставить краевую задачу теории упругости (термоупругости) и разработать эффективный метод ее реализации. Аналитическое решение такого рода задач практически невозможно в связи со сложной геометрией области тел и граничных условий поэтому в настоящее время применение нашли различные численные методы. Наиболее распространенным численным методом решения краевых задач является метод конечных элементов (МКЭ). Однако он не свободен от недостатков. Для решения поставленной задачи используем метод потенциала, с помощью которого дифференциальные уравнения сводится к интегральным уравнениям Фредгольма 2-го рода и который имеет некоторые преимущества по сравнению с МКЭ [3].

Согласно [2] краевая осесимметричная задача неоднородной термоупругости сводится к решению дифференциальных уравнений равновесия в частных производных:

$$\begin{aligned} \Delta u - \frac{u}{\rho^2} + \frac{1}{1-2\nu} \frac{\partial e}{\partial \rho} - \frac{2(1+\nu)}{1-2\nu} \frac{\partial}{\partial \rho} \left(\int_0^T \alpha(T) dT \right) &= - \frac{2(1+\nu)}{E^2} \frac{dE}{dT} \left(\frac{\partial T}{\partial \rho} \sigma_{\rho\rho} + \frac{\partial T}{\partial z} \sigma_{\rho z} \right), \\ \Delta w + \frac{1}{1-2\nu} \frac{\partial e}{\partial z} - \frac{2(1+\nu)}{1-2\nu} \frac{\partial}{\partial z} \left(\int_0^T \alpha(T) dT \right) &= - \frac{2(1+\nu)}{E^2} \frac{dE}{dT} \left(\frac{\partial T}{\partial z} \sigma_{\rho z} + \frac{\partial T}{\partial z} \sigma_{zz} \right), \end{aligned} \quad (1)$$

где u, w – перемещения, ρ, z, ϑ – цилиндрические координаты $e = \frac{\partial u}{\partial \rho} + \frac{u}{\rho} + \frac{\partial w}{\partial z}$,

и граничных условий

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial u}{\partial \rho} + \frac{3\nu}{1-2\nu} e \right) n_\rho + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial \rho} \right) n_z &= \frac{1+\nu}{1-2\nu} \int_0^T \alpha(T) dT, \\ \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial \rho} \right) n_\rho + \left(\frac{\partial w}{\partial z} + \frac{3\nu}{1-2\nu} e \right) n_z &= \frac{1+\nu}{1-2\nu} \int_0^T \alpha(T) dT, \end{aligned} \quad (2)$$

где n_ρ, n_z – направляющие косинусы внешней нормали к поверхности тела, а также уравнений теплопроводности

$$\begin{aligned} \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} \left(\rho \frac{\partial T^*}{\partial \rho} \right) + \frac{\partial^2 T^*}{\partial z^2} &= 0, \\ \frac{\partial^2 T^2}{\partial \rho^2} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial T^*}{\partial \rho} + \frac{\partial^2 T^*}{\partial z^2} &= 0, \end{aligned} \quad (3)$$

где $T^* = \int_0^T \lambda(T) dT$, $\lambda(T) = \lambda_0(1 - kT)$ – коэффициент теплопроводности, k – эмпирический коэффициент.

Используя метод возмущений [2], краевая задача (1), (2) сводится к решению осесимметричной задачи стационарной термоупругости однородного тела (нулевое приближение) и последовательности краевых задач теории упругости (последующие приближения).

Представляя температуру T^* в виде функции Грина, вместо (3) получаем интегральное уравнение краевой задачи теплопроводности

$$2\pi T^*(x) = \int_L \frac{dT^*}{dn_y} \rho_z dl_y \frac{4}{\sqrt{R^2}} K + \int_L T^*(y) \rho_y dl_y \frac{2}{\sqrt{R^2}} \times \left\langle \left\{ \frac{2\rho_y}{r^2} [(\rho_y - \rho_x)n_{\rho_y} + Zn_{zy}] - n\rho_y \right\} E + n\rho_y K \right\rangle. \quad (4)$$

Здесь x, y – параметрическая и текущая точки при интегрировании, $r^2 = \rho_x^2 + \rho_y^2 - 2\rho_x\rho_y \cos Q + Z^2$, $Z = Z_y - Z_x$; $Q = \vartheta_y - \vartheta_x$, dl_y – элемент дуги меридионального контура Z ; E, K – эллиптические интегралы.

Решение системы (1) разыскиваем в виде

$$u_\rho^0 = u_\rho^u + u_\rho^T, \quad u_z^0 = u_z^u + u_z^T, \quad (5)$$

где u_ρ^u, u_z^u – общие решения однородных дифференциальных уравнений (1), которые приведены в [4], u_ρ^T, u_z^T – частные решения Гудьера, интегральное представление которых приведено в [4].

С помощью соотношений Дюгамеля-Неймана были построены интегральные уравнения напряжений $\sigma_{\rho\rho}^0, \sigma_{zz}^0, \sigma_{\rho z}^0, \sigma_{\vartheta\vartheta}^0$, (соответствуют (5), а выражения $\sigma_{\rho\rho}^u, \dots, \sigma_{\vartheta\vartheta}^u$, приведены в [4]) и сингулярные интегральные уравнения (СИУ) краевой задачи термоупругости на нулевом приближении

$$v_\rho(x) + \frac{1}{4\pi(1-\nu)} \int_L [v_\rho(y)(A_{\rho\rho}n_{\rho_x} + A_{\rho_z}n_{z_x}) + v_z(y)(B_{\rho z}n_{z_y})] dl_y = p_\rho(x) + p_\rho^T(x),$$

$$v_z(x) + \frac{1}{4\pi(1-\nu)} \int_L [v_\rho(y)(A_{\rho z}n_{\rho_x} + A_{zz}n_{z_x}) + v_z(y)(B_{\rho z}n_{\rho_x} + B_{zz}n_{z_x})] dl_y = p_z(x) + p_z^T(x) \quad (6)$$

где v_ρ, v_z – плотности потенциала простого слоя, $A_{\rho\rho}, \dots, B_{zz}$ – коэффициенты, полученные в [4], $p_\rho(x), -p_z(x)$ – компоненты механических усилий, $p_\rho^T(x), p_z^T(x)$ – компоненты фиктивной температурной поверхностной нагрузки.

Здесь решение задачи теории упругости разыскиваем в виде

$$p_\rho^T(x) = -(\sigma_{\rho\rho}^T \cdot n_{\rho_x} + \sigma_{\rho z}^T \cdot n_{z_x}), \quad p_z^T(x) = -(\sigma_{\rho z}^T \cdot n_{\rho_x} + \sigma_{zz}^T \cdot n_{z_x}). \quad (7)$$

В результате решения (6) определялись плотности v_ρ, v_z , а затем напряжения $\sigma_{\rho\rho}^0, \dots, \sigma_{\vartheta\vartheta}^0$. Значения напряжений использовались для решения краевой задачи теории упругости на первом приближении.

Здесь

$$u_{\rho}^{(1)} = u_{\rho}^u + u_{\rho}^N, \quad u_z^{(1)} = u_z^u + u_z^N \quad (8)$$

Интегральные представления u_{ρ}^u и u_z^u известны [4], а

$$u_{\rho}^N = -\frac{(1+\nu)^2}{4\pi(1-\nu)} \int_S f(T) \left[\frac{\chi_{\rho}}{E(T)} C_{\rho\rho}^N + \frac{\chi_z}{E(T)} C_{\rho z}^N \right] dS_y, \quad (9)$$

$$u_z^N = -\frac{(1+\nu)^2}{4\pi(1-\nu)} \int_S f(T) \left[\frac{\chi_{\rho}}{E(T)} C_{z\rho}^N + \frac{\chi_z}{E(T)} C_{zz}^N \right] dS_y,$$

где

$$f(T) = \frac{1}{E^2} \frac{dE}{dT}, \quad \chi_{\rho} = \left(\frac{\partial T}{\partial \rho} \sigma_{\rho\rho}^0 + \frac{\partial T}{\partial z} \sigma_{\rho z}^0 \right), \quad \chi_z = \left(\frac{\partial T}{\partial \rho} \sigma_{\rho z}^0 + \frac{\partial T}{\partial z} \sigma_{zz}^0 \right)$$

$C_{\rho\rho}^N, \dots, C_{\rho z}^N$ – аналогичны соотношениям в работе [4].

Система СИУ такая же как и (6), но вместо p_{ρ}^T и p_z^T берется фиктивная нагрузка

$$p_{\rho}^N = -\left(\sigma_{\rho\rho}^N \cdot n_{\rho x} + \sigma_{\rho z}^T \cdot n_{z_x} \right), \quad p_z^N = -\left(\sigma_{\rho z}^N \cdot n_{\rho x} + \sigma_{zz}^N \cdot n_{z_x} \right) \quad (10)$$

На основе метода механических квадратур разработан алгоритм численного решения интегральных уравнений и составлена программа для ПЭВМ. Интегралы вычислялись с помощью квадратурных формул Гаусса и Лашенова. Реализован тестовый пример. В качестве примера решена задача о нагреве полой сферы. Результаты численного решения сравнивались с решением в [2]. Ниже на рисунке показаны соответствующие графики напряжений.

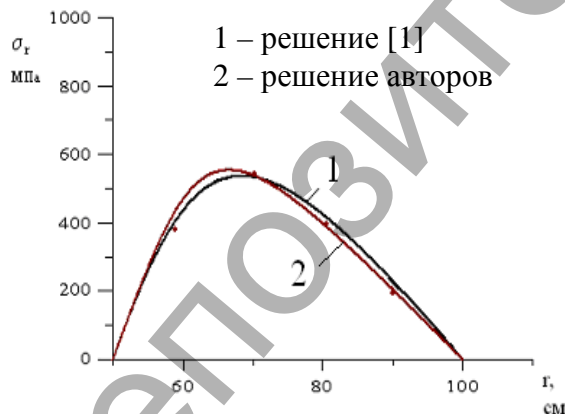


Рисунок 1 – Распределение радиальных напряжений.

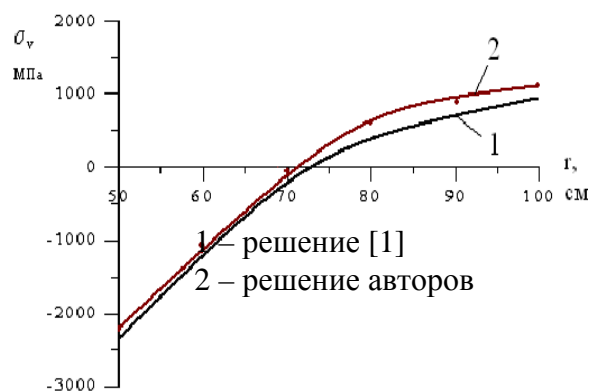


Рисунок 2 – Распределение тангенциальных напряжений.

Здесь $T_a = 500^\circ C$, $T_b = 400^\circ C$, $\nu = 0,33$, $a = 0,5$ м, $b = 1$ м.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Писаренко, Г.С. и др. Прочность материалов при высоких температурах / Г.С. Писаренко, В.Н. Руденко, Г.Н Третьяченко, В.Т. Трощенко. – Киев. «Наукова думка», 1966. – 795 с.

2. Ломакин, В.А. Теория упругости неоднородных тел / В.А. Ломакин. – М. Изд-во МГУ, 1976. – 368 с

3. Копейкин, Ю.Д. и др. Интегральные уравнения осесимметричной краевой задачи термоупругости. / Ю.Д. Копейкин, В.М. Хвисевич // Известия АН СССР. МТТ, 1991, – №6. – М., – с. 52-57.

4. Копейкин, Ю.Д. Прямое решение осесимметричной второй задачи теории упругости методом бигармонических потенциалов / Ю.Д. Копейкин, А.А. Калинин // Изд. АН БССР. Сер. физ. мат. наук, 1977, – №3. – с. 85-90.

УДК 539.3

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ В ПРИПОВЕРХНОСТНОМ СЛОЕ С УЧЕТОМ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

***Батрак В.В., Веремейчик А.И., Сазонов М.И.,
Хвисевич В.М., Черноиван Н.В.***

Брестский государственный технический университет,
Брест, Республика Беларусь

В любом процессе термообработки конструктивных элементов машин и механизмов (закалке, поверхностном плазменном напылении и т.д.) важным фактором является исследование формирования полей температур и термонапряжений [0-4]. Температурное поле является одной из основных физических характеристик поверхностного упрочнения высококонцентрированными источниками нагрева. Зная изменение температуры тела в зависимости от времени, ее установившиеся значения в определенной точке, можно судить (в зависимости от условий обработки, физических свойств тел, окружающей среды) о том, какие процессы термообработки могут быть реализованы. Определение температурного поля в теле детали при нагреве и охлаждении позволяет прогнозировать состав вещества после термообработки, его фазовое и структурное состояние.

Не смотря на то, что решения задач механики термонапряжений для тел, находящихся в условиях нестационарного температурного воздействия от движущегося источника нагрева, получены в целом ряде работ [1, 3, 4], все они далеки до окончательной завершенности вследствие трудностей, как при постановке самих экспериментальных исследований по изучению распространения полей температур и термонапряжений, так и трудностей решения интегральных уравнений задач нестационарной теплопроводности. Особенно это актуально при исследовании деформированного состояния тел с учетом анизотропии и задач терморазрушения в условиях быстрого нагрева тел.

В качестве высококонцентрированного источника нагрева использовался плазмотрон постоянного тока. Для перемещения плазмотрона с заданной скоростью создано устройство, реализующее плоскопараллельное движение по копиру упрочняемой детали относительно плазмотрона. Силовой электроисточ-

ник обеспечивает горение дуги при напряжении 14-35 В и токах от 6 А до 32 А. Плазмотрон позволяет реализовать плотность теплового потока на поверхности детали $2,5 \cdot 10^7 - 6,0 \cdot 10^7$ Вт/м².

Для определения температурных полей использовалась разработанная приборная система. В состав системы входят датчик, цифровой анализатор и компьютер. Цифровой анализатор позволяет усиливать малый аналоговый сигнал, отфильтровывать его, отцифровывать и масштабировать. Взаимодействие оператора с системой обеспечивается персональным компьютером. Система позволяет выполнять регистрацию температуры со скоростью 1000 измерений в секунду.

Датчик устанавливается в отверстие, выполненное в теле образца на расстоянии 0,5 мм ниже обрабатываемой поверхности. Температура регистрировалась системой, компьютер обрабатывал в данный момент времени тепловой поток, а затем коэффициент теплообмена для каждого момента времени.

Если датчик (точка измерения температуры) расположен очень близко от нагреваемой поверхности (расстояние меньше чем 0,1 мм), можно с определенной долей погрешности считать, что измеренная температура соответствует температуре поверхности образца. В случае, когда расстояние между точкой измерений и поверхностью больше, температура в зависимости от времени определялась обратным методом. Определенная этим способом температура поверхности используется в качестве граничных краевых условий Дирихле для численной реализации уравнений теплопроводности Фурье методом конечных элементов.

При проведении экспериментов полагали, что процесс распространения тепла является одномерным. В такой постановке уравнение имеет вид

$$\rho c \frac{dT(z, t)}{dt} = \frac{\partial T}{dz} \left(\lambda \frac{\partial T(z, r)}{\partial z} \right), \quad (1)$$

где c – коэффициент теплоемкости; ρ – плотность материала; λ – коэффициент теплопроводности; T – температура; t – время; z – координата в направлении распространения тепла.

Результаты измерений регистрировались компьютером и использовались для дальнейшего анализа с помощью программы ANSYS, которая позволяет вычислять температуру в трехмерном измерении во время плазменной обработки.

При плазменной обработке поверхности тепловая нагрузка на обрабатываемую деталь передается ограниченной площадке. Струя ориентирована перпендикулярно поверхности и на ней образуется участок оплавленного материала, размеры которого легко могут быть измерены. Поскольку при этом получение оплавленной зоны не является целью данного процесса, а инструмент непрерывно перемещается вдоль детали с заданной скоростью, то можно в первом приближении считать, что в пятне нагружения на поверхности достигается температура, равная температуре плавления материала и дальнейшего разогрева этого уже жидкого металла не происходит. В этом случае фазовые превращения можно считать отсутствующими и для определения температурного поля обрабатываемой детали можно применить классические уравнения тепло-

проводности твердого тела с граничными условиями первого рода

$$\frac{dT}{dt} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right), \quad (2)$$

где a - коэффициент температуропроводности материала, x, y, z - координаты расчетной точки тела.

Из экспериментов известно, что для рассматриваемой задачи зона интенсивного прогрева составляет по глубине величину порядка радиуса R пятна нагружения, поэтому при определении температурного поля можно даже для пластины небольшой толщины $h > 10R$ использовать решения, полученные для полупространства. Такое решение, пригодное для вычисления температуры в любой точке в любой момент времени при стационарном поверхностном источнике ограниченных размеров, известно и имеет вид

$$T(t, r) = \frac{kRq}{2\lambda} \int_0^\infty J_0(\varphi r) \cdot J_1(\varphi R) \left\{ \exp(-\varphi z) \Phi^* \left[\frac{z}{2\sqrt{at}} - \lambda\sqrt{at} \right] - \exp(\varphi z) \Phi^* \left[\frac{z}{2\sqrt{at}} + \lambda\sqrt{at} \right] \right\} \frac{d\varphi}{\varphi}, \quad (3)$$

где q -интенсивность теплового потока поверхностного источника, λ - коэффициент теплопроводности материала, $r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$ - расстояние от центра пятна нагружения до рассматриваемой точки пространства, J_0 и J_1 - функции Бесселя первого рода нулевого и первого порядка соответственно, $\Phi^* = 1 - \Phi$, где Φ - функция ошибок.

Для расчетов использовались значения коэффициентов теплопроводности λ и теплоемкости C в зависимости от температуры, которые приведены в [5]. По результатам вычислений построены графики распределения температуры для стали 45 (рисунок 1).

Степень локализации ввода тепла в область изделия (пятно нагрева) влияет на скорость охлаждения поверхностного слоя металла, структуру и свойства упрочненной зоны. В общем случае порядок величины скорости охлаждения практически соответствует порядку величины тепловой мощности плазмотрона.

На основании экспериментальных исследований построены зависимости скорости нагрева и охлаждения поверхностного слоя, образцов при воздействии плазменной струи.

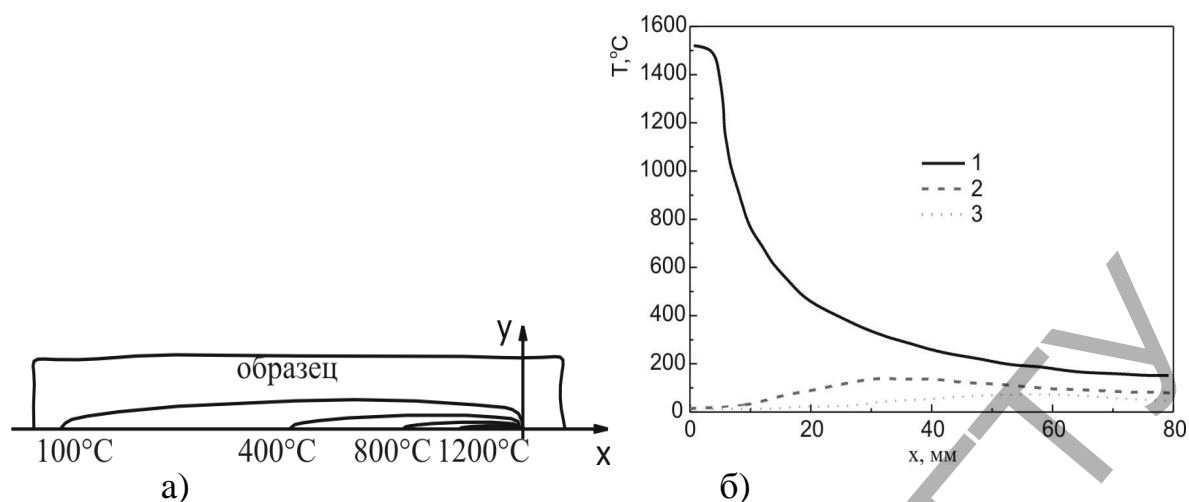


Рисунок 1 - Распределение температуры в поверхностном слое металла; а) изотермы на поверхности образца, б) расчетные значения температуры по глубине образца. 1 - глубина 0 мм; 2 - глубина 1 мм; 3 - глубина 1,5 мм.

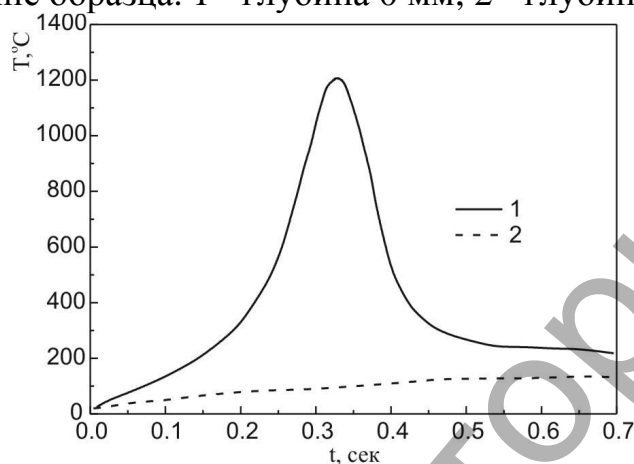


Рисунок 2 - Графики экспериментальных значений температуры; 1) исходные (экспериментальные) значения на глубине; 2) расчетные значения на поверхности

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Спиридонов, Н.В., и др. Плазменные и лазерные методы упрочнения деталей машин / Н.В. Спиридонов, О.С. Кобяков, И.Л. Куприянов, В.Н. Чачин - Мн.: Вышэйшая школа, 1988. - 155 с.
2. Веремейчик, А.И., и др. Теоретическое и экспериментальное определение температурных полей при воздействии плазменной струи / А.И. Веремейчик, В.М. Хвисевич, Д.Л. Цыганов // Межвуз. сб. научн. трудов. Под ред. Н.Б. Демкин. - Тверь: ТГТУ, 2006. - С. 139-146.
3. Кундас, С.П. Компьютерное моделирование процессов термической обработки сталей: монография. - Мн.: Бестпринт. 2005. - 313 с.
4. Карслоу, Г., Егер Д. Теплопроводность твердых тел / Г. Карслоу, Д. Егер. - М.: Наука. 1964. - 497 с.
5. Варгафтик, Н.Б. Теплофизические свойства веществ. Справочник / Н.Б. Варгафтик. М.: Госэнергоиздат, 1956. - 340 с.

**АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ,
ПРОИЗВОДСТВА И ЭКСПЛУАТАЦИИ
АВТОМОБИЛЬНОГО ТРАНСПОРТА**

Репозиторий ЮрГТУ

СИНТЕЗ ПРОЦЕССОВ И СРЕДСТВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОСНАЩЕНИЯ РЕМОНТНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Иванов В.П.

Полоцкий государственный университет
Полоцк, Республика Беларусь

Введение. Стараниями народившегося бизнеса обусловлено много нареканий и недоверия к индустриальному ремонту машин в борьбе за место на рынке. Тезис о том, что машина после пяти лет использования должна быть утилизирована, а вместо нее изготовлена новая машина, не подтвержден ни теоретически, ни практически. Только состоятельному владельцу позволительно после такого срока использования сбывать ее менее состоятельным владельцам, в том числе в третьи страны, и приобрести новую машину. Трудно представить, как можно в масштабах отрасли промышленности спустя такой срок использования заменить парк машин на новый. Использование остаточного ресурса машин после достижения ими предельного состояния является экономически эффективным.

В настоящее время человечеству для удовлетворения своих потребностей требуется невозобновляемых природных ресурсов на одну треть больше, чем может обеспечить Земля [1]. Одним из вариантов существенного уменьшения их потребления является реновация техники, необходимость которой подчеркивает также тот факт, что даже с учетом естественной выбраковки деталей (до 20 %) при ремонте машин потребление первичных природных ресурсов и загрязнение окружающей среды снижаются в 5–10 раз по сравнению с одноименными показателями при их изготовлении.

Технологическая подготовка производства к ремонту отдельных агрегатов машин (двигателей, агрегатов трансмиссии, систем электрооборудования и питания и др.) связана с большими объемами разработки технологической и конструкторской документации и последующим изготовлением средств ремонта [2]. В практике проектирования процессов и средств ремонта недостаточно рассматриваются их методы, синтезирующие наряду с выполнением предписанных функций и новые технические решения.

Методы исследования. При описании предлагаемого метода синтеза процессов и средств ремонта изделий использованы морфологический анализ Ф. Цвики [3] и динамическое программирование [4].

Основная часть. Схема принятия технических решений при проектировании процессов и средств ремонта приведена на рисунке 1. Карточка действующих в производстве и приведенных в литературе процессов и средств ремонта способствует использованию в проектировании проверенных передовых и эффективных технических решений.

Декомпозиция с последующей классификацией процессов (операций) и средств ремонта (однофункциональных механизмов) с помощью морфологического анализа позволяет унифицировать элементы и сформировать из них мо-

дули, что уменьшает трудоемкость и длительность подготовки производства, расширяет масштабы применения прогрессивных средств и процессов, реализует политику ресурсосбережения и обеспечивает гибкость производства. Необходимость технологической унификации заключается в уменьшении числа видов процессов и средств, близких по содержанию и устройству, соответственно. Диалектическая связь между процессами и средствами заключается в том, процессы являются функциями материальных объектов – СТО.

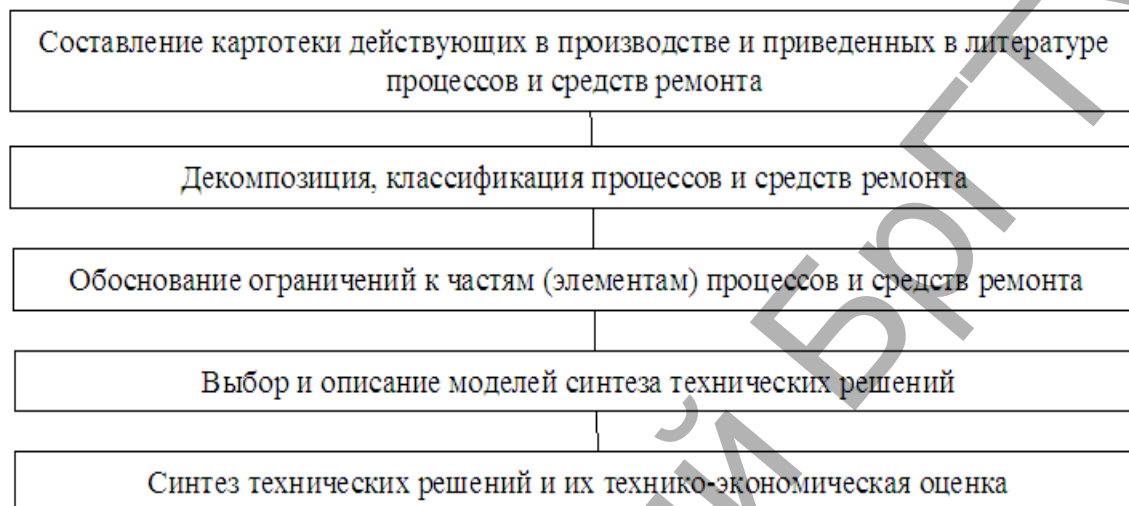


Рисунок 1 – Блок-схема принятия технических решений при проектировании процессов и средств ремонта изделий

Варианты частей решений (элементов) определяют из логических и эвристических представлений о различных способах преобразования энергии и движения, разного состава элементов и их сочетаний. Глубину поиска обеспечивает широкий учет применяемых и мыслимых элементов и рассмотрение множества как известных, так и новых сочетаний их признаков. Множество сочетаний признаков решений W , находящихся в конъюнктивно-дизъюнктивных связях «и – или» и выражается зависимостью

$$W \subseteq [(p_{11} \cup p_{12} \cup \dots \cup p_{1m_1}) \cap (p_{21} \cup p_{22} \cup p_{2m_2}) \cap \dots \cap (p_{k1} \cup p_{k2} \cup p_{km_k})],$$

где p_{ij} – элементы решения; $i = (1 \dots k)$; $j = (1 \dots m_k)$.

В техническое решение могут быть включены только те элементы, которые удовлетворяют ограничениям по качеству, безопасности и производительности. Качество элемента решения выражается его способностью обеспечить нормативное значение параметра технологической или нормативной документации. Безопасность труда и охрана окружающей среды оцениваются соответствующими индексами риска, а производительность труда согласуют с производственной программой предприятия.

Оптимизационный синтез процессов и средств ремонта – образование структур (в том числе новых) из элементов, удовлетворяющих установленным ограничениям и обеспечивающих минимальные затраты на свое создание и исполь-

зование. При техническом перевооружении и реконструкции производства выполняют синтез в масштабах отдельных рабочих мест, а при создании нового производства – в масштабах производственных участков.

Математическая сторона синтеза средства ремонта совпадает с выбором оптимального технологического процесса (рис. 2), поскольку в обоих случаях используют схожие графы (составленные из вершин и ребер) и рассматривают одни и те же функции. Длины ребер соответствуют затратам на создание и использование соответствующего элемента решения.

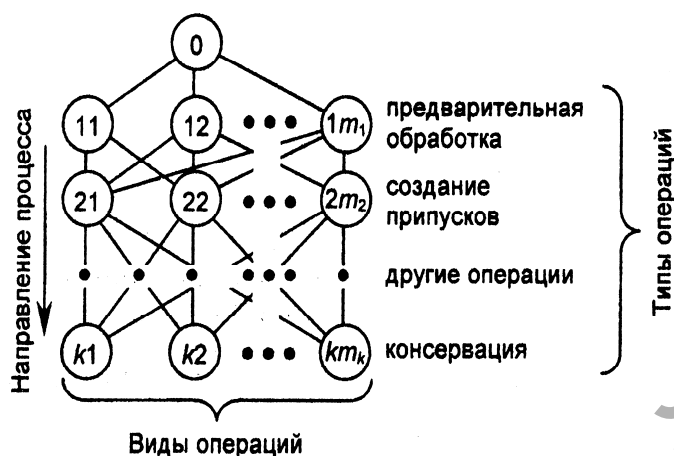


Рис. 2. Граф вариантов технологического процесса (на примере восстановления детали): 1, 2, ... , k – типы операций; m_1, m_2, \dots, m_k – количество видов операций каждого типа

Подмножество вершин на кратчайшем пути из вершины O в одну из вершин нижнего ряда вершин графа соответствует оптимальной структуре решения. Искомый путь между указанными вершинами определяют с помощью динамического программирования [4], для чего находят направления движения из каждой вершины графа, исходя из рекуррентных соотношений

$$Z_{i+1} = \min (\text{по всем вершинам графа}) [Z_i + Z_{(i+1)-1}], \text{ руб.}$$

где i – шаги решения; Z_{i+1} – затраты, отнесенные к $i+1$ операциям или механизмам, руб; Z_i – приведенные затраты на элемент решения (далее: затраты), отнесенные к i операциям или механизмам, при условии, что соответствующий участок графа выбран оптимальным образом, руб; $Z_{(i+1)-1}$ – затраты, отнесенные к присоединению $(i+1)$ -й(го) операции (механизма) к i его операциям (механизмам), руб.

Предложенный метод синтеза позволяет проектировать как единичные технологические объекты, так и их параметрические ряды. Во втором случае вначале разрабатывают для каждого типа технологических переходов базовый исполнительный агрегат путем его структурного синтеза. Этот агрегат предназначен для выполнения технологического перехода, значение главного параметра которого соответствует модальному (наиболее часто встречаемому) значению функции спроса на агрегаты данного типа. Затем в результате параметрического синтеза из каждого базового агрегата образуют ряд однотипных агрегатов с измененными значениями главного параметра. Этот ряд агрегатов способен выполнить все технологические переходы данного типа. И в заключение разра-

батывают компоновки технологических машин, включающие различные исполнительные агрегаты, выбранные из разных типоразмерных рядов.

Приведенный метод синтеза процессов и средств ремонта был использован в технологической подготовке производства на Полоцком заводе «Проммашремонт».

Заключение. Разработан, предложен и апробирован метод синтеза процессов и средств ремонта, позволяющий уменьшить сроки и затраты на технологическую подготовку ремонтного производства с повышением его технического уровня и качества услуг.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Намаконов, Б.В. Экологичность реновации изделий – в учебные планы подготовки кадров / Б.В. Намаконов // Инженерия поверхности и реновация изделий: материалы 16-ой Международной научно-технической конференции (Одесса, 30 мая – 03 июня 2016 г.). – Киев: АТМ Украины, 2016. – С. 107–110.
2. Иванов, В.П. Подготовка ремонтного производства: науч. издание / В.П. Иванов, А.П. Кастрюк. – Новополоцк: ПГУ, 2011. – 272 с.
3. Zwicky F. Entdecken, Erfinden, Torschen im morphologischen Wettbild. Munchen – Zurich, Knaur, 1966.
4. Беллман, Р. Динамическое программирование / Р. Беллман; пер. с англ. – М.: Иностранная литература, 1960. – 400 с.

УДК 629

МОДАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ АВТОМОБИЛЯ

Сафин А.И., Макарьянц Г.М., Прокофьев А.Б., Шахматов Е.В.

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

Работоспособность, ресурс и качество изделий машиностроения, в значительной степени зависят от интенсивности виброакустических процессов, к которым следует отнести вибрацию механических элементов, излучаемый агрегатами и системами шум [1, 2]

Одним из направлений повышения виброакустического комфорта автомобиля является разработка кузова с заданными модальными параметрами. Способность в достоверном определении как можно большего числа собственных частот и форм колебаний кузова автомобиля является залогом успеха при верификации его конечно-элементной модели. При этом лимитирующим является количество точек, в которых определяется вибрация. Как правило, проведение модального анализа автомобиля в сборе связано со значительными временными и финансовыми затратами. На практике получил широкое распространение метод, в котором экспериментально определяются модальные параметры первого изгибного и крутильного резонанса только кузова автомобиля. Далее определённое значение частот уменьшают на 10-12 Гц и получившееся значение считают модальными частотами самого автомобиля. В этом плане применение бесконтактного сканирования вибрации даёт ощутимые преимущества. Поэто-

му разработка методики модального анализа кузова автомобиля, использующей в качестве основного измерительного инструмента 3-х компонентный лазерный сканирующий виброметр, является актуальной задачей.

Определение первых двух глобальных форм колебаний (крутильной и изгибной) кузова и автомобиля в сборе Volkswagen Polo проводилось на базе результатов сканирования виброскорости его поверхности. Сканирующие головки располагались напротив места сканирования и переставлялись по окончании сканирования фрагмента кузова. Впоследствии с помощью специального модуля ПО осуществлялась склейка результатов. Частотный диапазон возбуждения - 10...200 Гц. Амплитуда входного возбуждения - 1,5 А. Число спектральных линий или размер выборки - 1024. Частота оцифровки - 512 Гц (разрешение по частоте - 0,5 Гц). Стоит отметить частота оцифровки превышала верхнюю границу рабочего частотного диапазона, как минимум, в два раза. Количество усреднений (Averages) - 9. В качестве возбуждения использовался полигармонический сигнал таких видов, как pseudo random, periodic chirp, white noise. Для получения фазы колебаний использовался сигнал с датчика динамического усилия, установленного на штоке электродинамического вибровозбудителя.

Для получения изгибной формы колебаний необходимо, чтобы точка приложения возбуждающей силы находилась на оси движения автомобиля в районе переднего или заднего бампера. При поиске изгибной формы колебаний Volkswagen Polo возбуждалась при воздействии на балку под бампером [2]. Для получения крутильной формы колебаний необходимо, чтобы точка приложения возбуждающей силы была смещена относительно оси движения автомобиля, и располагалась в районе передних или задних крыльев. Крутильная форма колебаний Volkswagen Polo возбуждалась при воздействии за буксировочный крюк в задней части автомобиля [2].

Далее выполнялась условная разбивка автомобиля на фрагменты, виброметрирование которых проводилось отдельно [2]. Каждый из фрагментов сканировался в глобальной системе координат, приведение к которой осуществлялось на этапе сканирования геометрии. После завершения процесса выполнялась склейка результатов измерения вибрации всех фрагментов.

Одним из критерием оценки качества проведения модального анализа являлось значение функции когерентности, показывающей долю энергии колебаний, дошедших от вибровозбудителя до исследуемой поверхности автомобиля. Когерентность составила практически единицу [2], что подтверждает адекватность результатов модального анализа автомобиля.

Для сканирования автомобиля в сборе было проведено измерение более 400 точек, в каждой из которых определялся вектор виброскорости. Стоит отметить практическую невозможность выполнения замеров и обработки такого количества точек с помощью контактных трёхкомпонентных датчиков. На рисунках 1 и 2 представлен спектр виброскорости усредненный по всей поверхности.

После сканирования всего автомобиля, результаты были загружены в LMS Test.Lab для вычисления крутильной и изгибной формы колебания (рисунок 3).

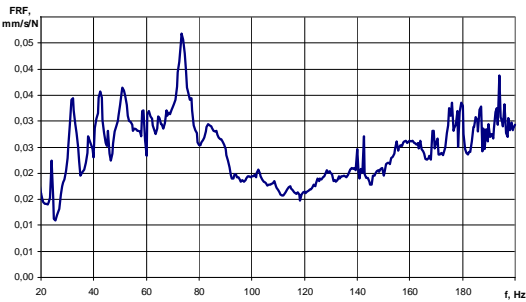


Рисунок 1 – Volkswagen Polo. Кручение. АЧХ автомобиля, осреднённая по всем сканируемым точкам

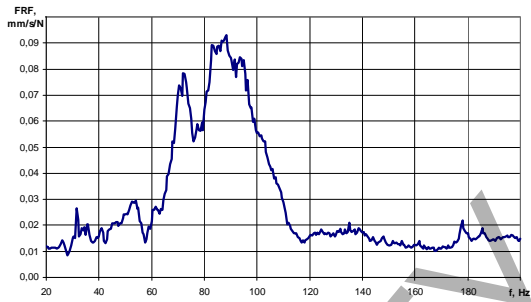
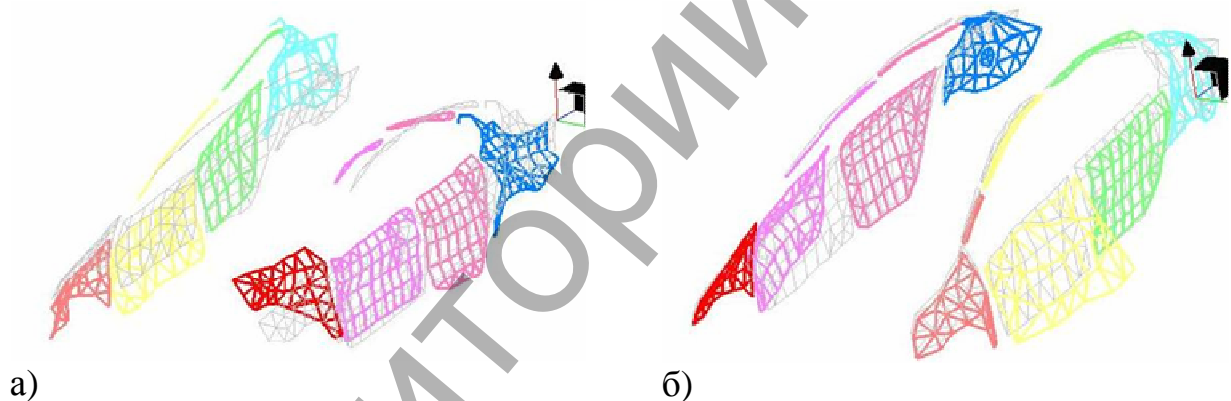


Рисунок 2 – Volkswagen Polo. Изгиб. АЧХ автомобиля, осреднённая по всем сканируемым точкам

Модальный анализ автомобиля Volkswagen Polo показал следующие собственные частоты колебаний:

- первая крутильная форма колебаний 24,3 Гц;
- первая изгибная форма колебаний 31,9 Гц.



- а) первая крутильная форма колебаний автомобиля. 24,3 Гц
 б) первая изгибная форма колебаний автомобиля. 31,9 Гц

Рисунок 3 – Volkswagen Polo

При этом спектр возбуждающей силы в частотном диапазоне от 20 Гц до 40 Гц был плавный, без резонансов, отклонение относительно среднего значения составило -2,75 % +2,11 % (при определении крутильной формы) и -2,28 % +1,89 % (при определении изгибной формы). Минимальное значение функции когерентности составило 98,5 % (при определении крутильной формы) и 94 % (при определении изгибной формы). Это говорит о высоком качестве сигнала возбуждения.

ОАО «АвтоВАЗ» предоставил данные по модальным характеристикам кузова автомобиля Volkswagen Polo (таблица 1). Видно, что разница по модальным характеристикам кузова и автомобиля в сборе составляет 23 и 18 Гц. Это говорит о заниженном значении существующих предположения о разнице собственных колебаний кузова автомобиля и автомобиля в сборе в 10-12 Гц.

Таблица 1 – Модальные характеристики кузова и автомобиля в сборе

Модель	Комплектация	Кручение	Изгиб
Volkswagen Polo	Кузов	47,7 Гц	49,9 Гц
	Автомобиль в сборе	24,3 Гц	31,9 Гц

В рамках данного исследования проведено бесконтактное сканирование вибрации автомобиля Volkswagen Polo. Автомобиль устанавливался на полу в помещении. Специальных средств закрепления предусмотрено не было. Полученные результаты были использованы для расчёта модальных параметров автомобиля.

Результаты работы могут быть использованы при проектировании новых автомобилей на стадии верификации математических виброакустических моделей автомобилей, а также при виброакустической доводке пилотных образцов.

Технико-экономическая эффективность внедрения результатов работы заключается в меньших затратах времени и высокой точности виброметрирования поверхности исследуемого объекта. Если контактный способ измерения требует более трёх недель на проведение экспериментов, то на применение разработанной методики модального анализа автомобиля в сборе затрачивается не более трёх дней.

Работа выполнена при финансовой поддержке российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ).

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Bart Peeters, Herman Van der Auweraer, Patrick Guillaumeb and Jan Leuridan. The Poly-MAX frequency-domain method: a new standard for modal parameter estimation? Shock and Vibration 11 (2004) 395–409.

2. Georgy M. Makaryants, Artur I. Safin and Evgeny V. Shakhmatov Vehicle modal analysis, Proceedings of the 22th International Congress on Sound and Vibration, Florence, Italy, 12–16 July, (2015).

УДК 629.03-52

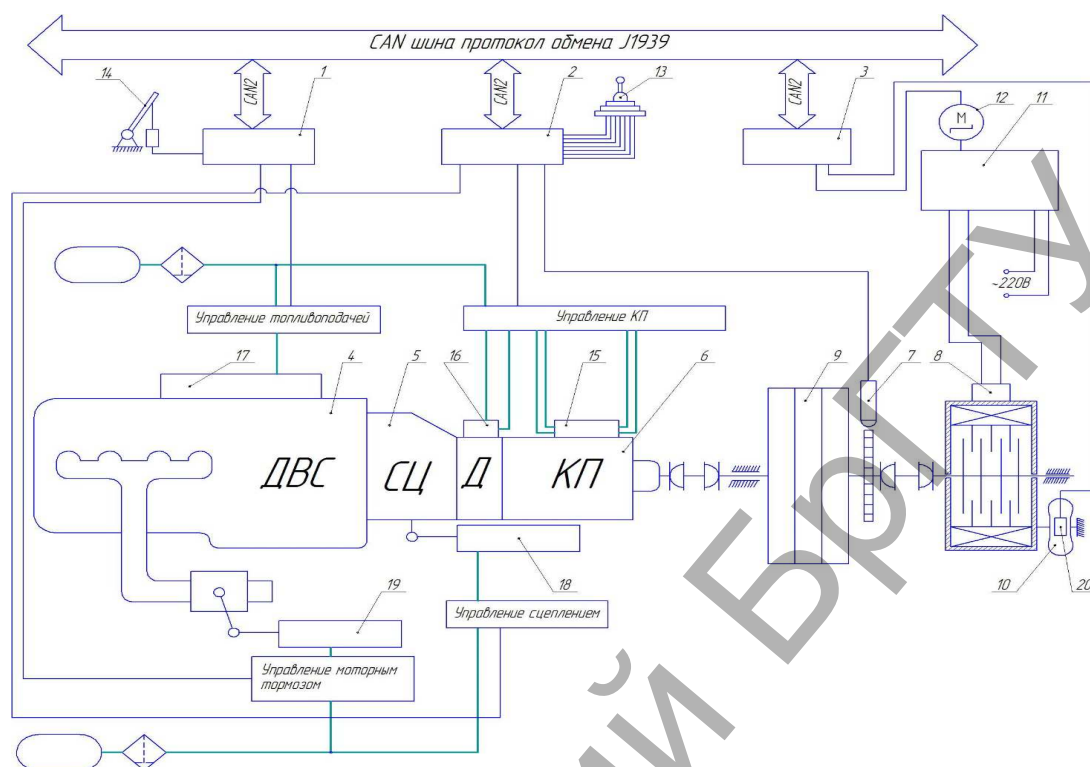
ЭЛЕКТРОННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ПОРОШКОВЫМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ТОРМОЗОМ НА ОСНОВЕ ТИРИСТОРНОГО ПРИВОДА

Кусяк В.А., Ле Ван Нгуа, Гурин А.Н.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Порошковые электромагнитные тормоза (ПЭТ) нашли широкое применение в качестве имитаторов сопротивления движению при проведении полунатурных испытаний узлов и агрегатов автомобилей [1, 2]. Принципиальная схема испытательного стенда [3], в состав которого входит электронная система управления порошковым электромагнитным тормозом, представлена на рис. 1. Стенд инерционный, разомкнутого типа, включает силовой агрегат (ДВС, фрикционное сцепле-

ние, КП), маховую массу, порошковый электромагнитный тормоз, пневматическую питающую часть и информационно-управляющую систему (ИУС).



1,2,3 – ЭБУ соответственно двигателем, КП, ПЭТ; 4 – дизельный двигатель, 5 – сцепление, 6 – составная КП, 7 – датчик частоты вращения, 8 – ПЭТ, 9 – маховая масса, 10 – скоба динамометрическая; 11 – тиристорный модуль ПЭТ, 12 – шаговый электродвигатель, 13 – электронная педаль «газа», 15,16,17,18,19 – исполнительные механизмы соответственно КП, делителя (Д), ДВС, сцепления, моторного тормоза, 20 – комплект тензометрических датчиков деформации скобы;

Рисунок 1 – Принципиальная схема испытательного стенда

Имитация сопротивления движению автомобиля осуществляется порошковым электромагнитным тормозом 8 (см. рис. 1) серии ПТ-250М с номинальным тормозным моментом 2500 Н·м, принцип действия которого основан на эффекте возникновения сопротивления сдвигу в свободном ферромагнитном порошке при наложении на него магнитного поля [4]. Аппаратную основу электронной системы составляет микропроцессорный блок 3 и тиристорный модуль 11, выходные параметры которого регулируются автоматически при подаче управляющего сигнала на шаговый электродвигатель 12. Для обмена информацией с другими электронными системами по протоколу высокого уровня SAE J1939, ЭБУ 3 интегрирован в архитектуру локальной электронной сети посредством CAN2 интерфейса. Для регулирования момента сопротивления электромагнитного тормоза необходимо точно и плавно регулировать напряжение на его обмотках возбуждения. Тормозной момент ПЭТ регулируется за счет изменения управляющего напряжения при подаче сигнала от ЭБУ на приводной электродвигатель 12 тиристорного модуля 11. Деформация динамометрической скобы 10, пропорциональная развиваемому тормозному моменту,

фиксируется комплектом тензометрических датчиков 20, что позволяет ввести обратную связь в системе управления ПЭТ. Моментная характеристика порошкового тормоза изменяется в зависимости от скорости вращения маховой массы, задаваемой величины дорожного сопротивления и давления в контурах рабочей тормозной системы.

Схема разработанного тиристорного привода (рисунок 2) позволяет регулировать напряжение на активной нагрузке в пределах от 0 до 220 вольт. При этом используются оба полупериода переменного тока, и к нагрузке подводится не половинная, а полная мощность.

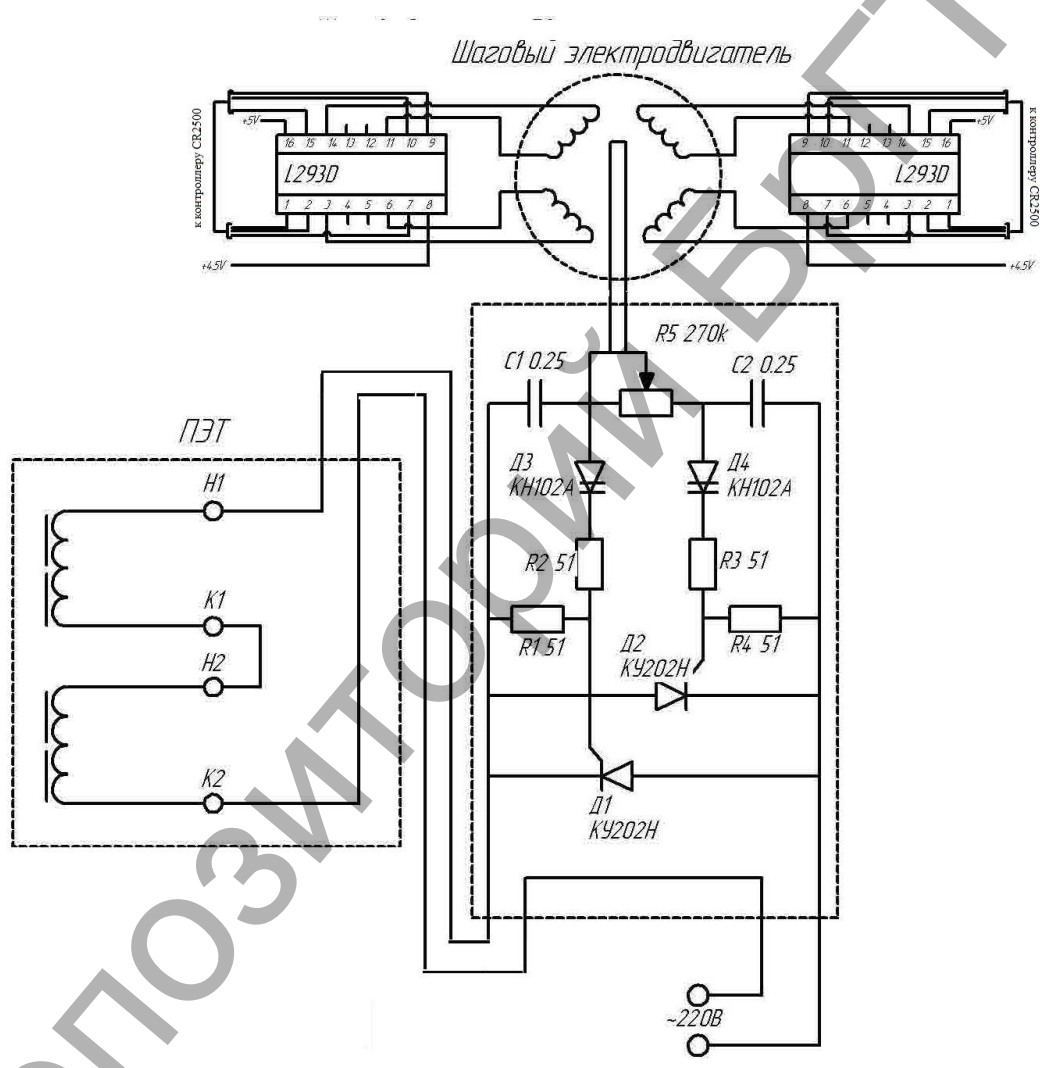


Рисунок 2. Схема тиристорного привода ПЭТ

Основными элементами электронного модуля 11 (рисунок 1) являются тиристоры Д1, Д2 (рисунок 2), включенные встречно друг другу и параллельно нагрузке. Они поочередно пропускают ток то в одном, то в другом направлении. При подключении тиристорного модуля к сети переменного тока, в первый момент времени оба тиристора закрыты, и конденсаторы заряжаются через переменный резистор R5. Тиристоры управляются импульсами, формируемыми диодисторами Д3 и Д4. В некоторый момент, определяемый сопротивлением включенной в цепь части резистора R5, открывается один из диодисторов, про-

пуская ток разряда соединенного с ним конденсатора. Вслед за динистором открывается и соответствующий тиристор. Через тиристор и нагрузку потечет ток. В момент смены знака полупериода тиристор закрывается, и начинается новый цикл зарядки конденсаторов, но уже в обратной полярности. Теперь открываются второй динистор и второй тиристор. Для регулирования напряжения на обмотках ПЭТ используется шаговый электродвигатель, который управляется от ЭБУ 3 (см. рис. 1) через драйверы L293D, поворачивая бегунок переменного резистора R5 на заданную величину, тем самым регулируя ток, подаваемый на обмотки порошкового электромагнитного тормоза.

В основу алгоритма управления электронным модулем положена зависимость тормозного момента ПЭТ от скорости движения автомобиля по передачам: $M_T=f(V_A, N)$. Величина момента сопротивления рассчитана для каждой передачи с учетом аэродинамического сопротивления и сопротивления качению колес автомобиля (см. табл. 1).

ЭБУ получает и обрабатывает сигналы от датчиков частоты вращения входного и промежуточного валов КП, положения рычага выключения фрикционного сцепления, а также сигнала от тензометрических датчиков деформации скобы ПЭТ. Затем производится расчет номера N текущей передачи и линейной скорости V_A автомобиля. По заложенным в электронный блок характеристикам микропроцессор рассчитывает методом двумерной интерполяции требуемый тормозной момент порошкового тормоза, сопоставляет его с фактическим тормозным моментом и при обнаружении расхождения более чем на 20 Нм подает напряжение на одну из 4-х обмоток шагового электродвигателя. При этом бегунок переменного резистора тиристорного модуля И1 (см. рис. 2) будет поворачиваться, увеличивая или уменьшая момент сопротивления электромагнитного тормоза. Направление вращения ротора электродвигателя определяется полярностью приложенного к обмоткам напряжения.

Таблица 1. Тормозной момент электрического нагружателя по передачам

передача	$U_{кп}$	M_{ψ} , Н·м	M_B , Н·м	M_{Σ} , Н·м	$M_{\text{торм}}$, Н·м	$n_{\text{двс}}$, об/мин	$n_{\text{вых}}$, об/мин
I	7,82	177,0	1,2	178,2	178,2	2300	294,1
II	6,38	177,3	2,0	179,4	179,4	2690	421,6
III	4,03	178,0	3,4	181,5	181,5	2680	665,0
IV	3,29	179,1	5,8	184,9	184,9	2670	811,5
V	2,5	180,8	9,7	190,6	190,6	2650	1060,0
VI	2,04	183,9	16,3	200,2	200,2	2640	1294,1
VII	1,53	188,9	27,3	216,3	216,3	2630	1718,9
VIII	1,25	197,4	45,8	243,2	243,2	2620	2096,0
IX	1	211,3	76,2	287,6	287,6	2610	2610,0
X	0,85	227,8	112,3	340,2	340,2	2600	3058,8

$U_{кп}$ – передаточное число КП; M_{ψ} , M_B – моменты сопротивления движению автомобиля, M_{Σ} – суммарный момент сопротивления в приведении к выходному валу КП;

$M_{\text{торм}}$ – тормозной момент на выходном валу нагружателя;

$n_{\text{вых}}$ – частота вращения выходного вала КП

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Стенд для испытания двигателей внутреннего сгорания: пат. RU 2059217C1, МПК G01M15/0007 Ю. М. Чикунов; заявл. 03.03.1993; опубл. 27.04.1996.
2. Стенды для измерения крутящего момента [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http // www.mix-eng.ru / stati / izmerenie-krutyaschego-momenta / stand-dlya-ispitaniya-dvigatelay.html](http://www.mix-eng.ru/stati/izmerenie-krutyaschego-momenta/stand-dlya-ispitaniya-dvigatelay.html)– Дата доступа: 24.03.2013.
3. Руктешель О.С. Интеллектуальная система управления стенда автоматизированного силового агрегата автомобиля / Руктешель О.С., Соломахо В.Л., Кусяк В.А., Филимонов А.А. // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2009. – № 4. – С. 31–36.
4. Системы автоматического управления с электромагнитными порошковыми муфтами / Г.Ф. Коновалов, О.Б. Коноваленко. – М.: "Машиностроение", 1986. –157 с.

УДК 621.89

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НАГРУЗОЧНЫХ ФАКТОРОВ И СПОСОБА ОБРАБОТКИ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИРАБОТКИ ПАР ТРЕНИЯ

Акулич Я.А., Акулич А.П.

Брестский государственный технический университет
Брест, Республика Беларусь

Приработка является обязательным этапом работы узла трения. Протекающая на заключительном этапе изготовления или в начале эксплуатации приработка, в значительной степени определяет безотказность работы всего механизма. Формирование в результате правильно осуществленной приработки несущих поверхностных слоев при минимуме износа в процессе приработки обеспечивает значительное повышение долговечности сопряжения.

Интенсивность изнашивания в процессе приработки во многом будет зависеть как от нагрузочных факторов, таких как нагрузка и скорость, так и от обеспечения оптимальных параметров качества взаимодействующих поверхностей пар трения на стадии их изготовления.

Для испытаний была определена пара трения типа “вал-втулка”. Образец, выступающий в качестве “вала” пары трения был изготовлен из легированной конструкционной стали 40Х с последующей термообработкой до НРС 40...45, ГОСТ 4543-71, а втулка – из оловянистой бронзы БрОЦС 5-5-5 ГОСТ 613-79. Известно, что сочетание материалов антифрикционных пар трения: сталь-бронза относится к наиболее благоприятным.

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

Для экспериментальных исследований, учитывая необходимость определить трибологические характеристики пар трения в процессе приработки имеющих отличную исходную шероховатость, полученную разными методами механической обработки, сопрягаемые поверхности группы образцов имели фактический усредненный параметр шероховатости поверхностей, полученных шлифованием $R_a = 0,27$ и точением $R_a = 1,31$. Оптимальные значения шероховатости

для исследования пар трения данного типа были подобраны в соответствии с рекомендациями в источниках [2].

При проведении всех серий трибологических испытаний реализовывалась прямая пара трения, т.е. соблюдались следующие условия: вращался образец с большей номинальной площадью и большей твердостью исходной структуры материала поверхности, нагрузка прикладывалась через неподвижный образец. Испытания проводились при величинах нагрузки $P=600$ Н и 1000 Н, скорости скольжения $V=1,0$ м/с.

Машина трения была снабжена камерой для испытаний пар трения в жидкой среде, в качестве которой было использовано масло И-40А, ГОСТ 20799-88, с кинематической вязкостью при 40°C $51-75$ мм²/с. Контроль температуры смазочной среды осуществляется при помощи погружной термопары “хромель-алюмель”.

Параметр шероховатости в процессе эксперимента определялся с помощью профилографа-профилометра модели 296.

Диаграмма, характеризующая изменение величины коэффициента трения в процессе приработки при разных величинах нагружения представлена на рисунке 1. Из диаграммы видно, что с увеличением нагрузки процесс приработки проходит быстрее, качество прирабатываемой поверхности так же будет улучшаться, что будет актуально до достижения некоторых критических величин нагружения.

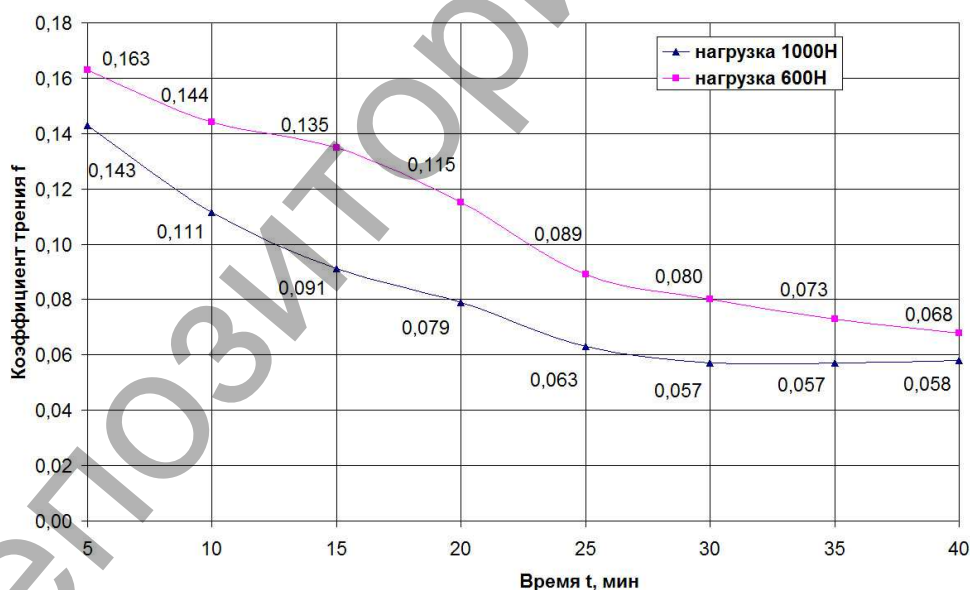


Рисунок 1 - Зависимость коэффициента трения от времени испытания пар трения при разных режимах нагружения.

При проведении исследований пар трения имеющих отличную исходную шероховатость, полученную разными методами механической обработки были получены следующие результаты. На рисунке 2 представлены кривые изменения значений среднего арифметического отклонения профиля R_a в процессе приработки пары трения. Из зависимостей видно, что при полученной после обработки чистовым точением характеристике качества поверхности $R_a=1,31$, в

завершении приработки наблюдалось уменьшение среднего арифметического отклонения профиля ($R_a=0,53$). Вместе с тем, при испытании образцов после шлифования и соответственно имеющих более низкую исходную шероховатость ($R_a=0,27$), параметр шероховатости при завершении приработки имел значения, превышающие исходные ($R_a=0,32$).

Таким образом, в процессе приработки была получена оптимальная шероховатость для данных условий трения, которая должна обеспечить наиболее приемлемый износ пары трения. Следует отметить, что значение параметра оптимальной шероховатости было, как больше так и меньше исходного, что свидетельствует о влиянии способа обработки поверхностей, на износные характеристики исследуемой пары трения.



Рисунок 2 - Изменения параметра среднего арифметического отклонения профиля R_a поверхности детали втулка в процессе приработки.

Динамика изменения величин коэффициента трения от времени испытания представлены на рисунке 3.

Как видно из приведенных зависимостей, через 25-30 минут после начала испытаний наблюдались стабильные значения коэффициента трения, что говорит о переходе исследуемой пары трения в равновесное динамическое состояние.

Следует отметить, что процесс приработки поверхностей пар трения обработанных шлифованием проходит быстрее. Отметим так же полученные более низкие значения коэффициента трения и температуры среды для данной пары трения. Очевидно, что время приработки, сопровождаемое интенсивным изнашиванием сопряженных поверхностей будет зависеть от того, насколько исходные параметры шероховатости будут близки к эксплуатационным, что обуславливает технологическое обеспечение оптимальных параметров качества взаимодействующих поверхностей пар трения на стадии изготовления.

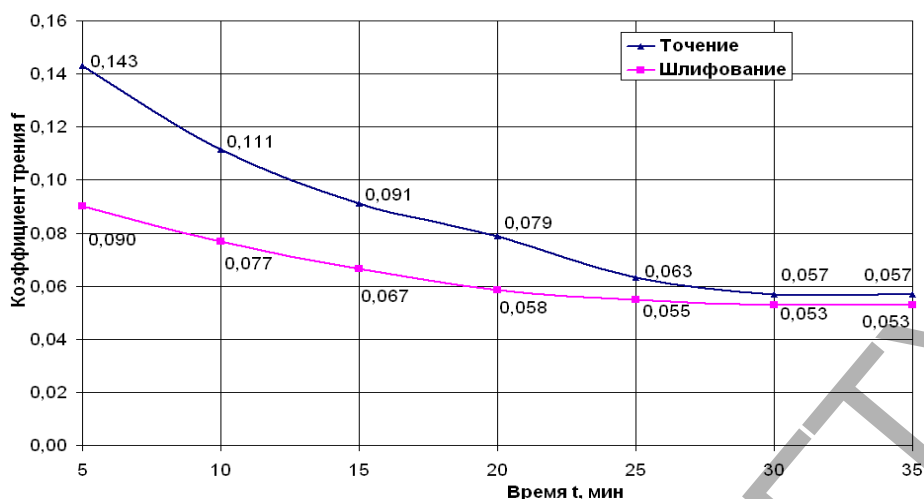


Рисунок 3 - Зависимость коэффициента трения от времени испытания пар трения в процессе приработки.

Результаты проведенных экспериментальных исследований позволяют сделать следующие основные выводы:

- нагрузка будут оказывать существенное влияние на качество и продолжительность приработки, что говорит о необходимости в дальнейших исследованиях рассмотреть влияние ступенчатого приложения нагрузки к паре трения в процессе приработки;

- сформировавшееся в результате приработки оптимальная шероховатость, как и другие параметры поверхностного слоя контактирующих деталей, будет зависеть от метода механической обработки поверхности, таким образом целесообразно на стадии изготовления технологически обеспечивать оптимальные параметры качества поверхностного слоя.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. 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.
2. Сулов, А.Г. Качество поверхностного слоя деталей машин / А.Г. Сулов – М.: Машиностроение, 2000. – 320 с.

УДК 629.3.082

ОПТИМИЗАЦИЯ СТРУКТУРЫ ЗОНЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ АВТОМОБИЛЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Монтик С.В., Головченко Ю.А.

Брестский государственный технический университет
Брест, Республика Беларусь

При проектировании и реконструкции автотранспортных предприятий (АТП) возникает задача оптимизации средств обслуживания автомобилей, т. е. определение оптимального количества постов зон диагностирования, технического обслуживания (ТО), текущего ремонта (ТР) автомобилей по критерию минимальных суммарных затрат на содержание производственного подразде-

ления и потери прибыли от простоя автомобилей. Наиболее широко используемыми методами моделирования для оптимизации структуры средств обслуживания автомобилей являются теория массового обслуживания и имитационное моделирование.

Рассмотрим методику оптимизации структуры средств обслуживания автомобилей с использованием имитационного моделирования на примере оптимизации зоны первого технического обслуживания (ТО-1) АТП.

Первоначально для заданного количества автобусов был выполнен технологический расчет и определено требуемое количество постов ТО-1 по детерминированной типовой методике, изложенной в [1, 2]. Расчет проводился для 70 автобусов МАЗ-256, III категория условий эксплуатации, климатический район – умеренно теплый, пробег с начала эксплуатации в долях от пробега до капитального ремонта (ресурса) – до 0,25. Режим работы зоны ТО-1: 302 дня в году, 2 смены, длительность смены 6,7 часа, общее количество автобусов на АТП составляет 200 единиц. Также определялся такт поста, ритм производства и требуемое количество постов ТО-1 по методике, изложенной в [2]. Требуемое расчетное количество постов ТО-1 составило 1,36, а принятое количество постов ТО-1 – 2 поста.

Для имитационного моделирования процесса функционирования зоны ТО использовалась система имитационного моделирования GPSS World Student Version 5.2.2. При составлении имитационной модели процесса функционирования зоны ТО, она рассматривалась в виде замкнутой системы массового обслуживания СМО с простейшими потоками. Количество постов в зоне ТО-1 изменялось от одного до пяти.

В системе GPSS World зона ТО моделировалась с помощью одноканального устройства (Facility) в случае одного поста и многоканального устройства (Storage) в случае двух и более постов. Автомобили, требующие ТО, моделировались с помощью транзактов. Сбор статистической информации о времени простоя автомобилей из-за занятости постов ТО осуществлялся с помощью объекта очередь (Queue).

Для моделирования простейшего потока требований интервал времени между соседними событиями должен иметь показательное распределение, поэтому интервалы времени поступления автомобилей на ТО задавались по экспоненциальному закону с математическим ожиданием, равным ритму производства, а интервалы времени на обслуживание одного автомобиля – также по экспоненциальному закону с математическим ожиданием равным такту поста.

Процесс имитационного моделирования функционирования зоны ТО состоит из следующих этапов. В имитационной модели функционирования зоны ТО-1 первоначально задавалось количество автомобилей в АТП. Затем выполняется задержка автомобиля на время выполнения транспортной работы до следующего ТО. Интервалы времени поступления автомобилей на ТО-1 задавались по экспоненциальному закону и определялись исходя из количества дней, через которые автомобиль должен поступить на ТО-1, т. е. скорректированный пробег до ТО-1 делился на среднесуточный пробег, а затем полученное количе-

ство дней умножалось на время работы зоны ТО-1 в сутки. Далее автомобиль проходит ТО и возвращается к выполнению транспортной работы до следующего ТО. Цикл повторяется для каждого автомобиля в течение времени моделирования работы зоны ТО. Время моделирования равнялось времени работы зоны ТО в течение года.

Для зоны ТО с двумя постами количество годовых обслуживаний $N_{ТО1Г}$, полученное по результатам имитационного моделирования, наиболее близко к результатам, полученным по типовой методике, для которой $N_{ТО1Г}$ составляет 784 обслуживания. При количестве постов больше 3 значительно снижается коэффициент загрузки зоны ТО и среднее число занятых постов в зоне, при этом количество обслуживаний ТО-1 за год увеличивается незначительно по сравнению с зоной ТО с 3 постами.

По данным имитационного эксперимента возможно определить оптимальное количество постов зоны ТО по критерию минимальных суммарных затрат $Z_{СУМ}$ от простоя автомобилей в ожидании обслуживания и от простоя постов зоны ТО в ожидании автомобилей на обслуживание. Критерий оптимальности задавался в виде

$$Z_{СУМ.ЧАС} = n_{ПОСТ} \cdot T_{МОД} \cdot (1 - K_{ИСП}) \cdot C_{ПР.ПОСТ} + N_{ТО1Г} \cdot T_{СР.ОЧ} \cdot C_{ПР.АВТ}$$

где $n_{ПОСТ}$ – количество постов зоны ТО, ед.; $T_{МОД}$ – время моделирования, час (в рассматриваемом случае $T_{МОД} = 4046,8$ часа); $K_{ИСП}$ – коэффициент загрузки зоны ТО; $N_{ТО1Г}$ – количество выполненных технических обслуживаний за 1 год (время моделирования зоны ТО); $T_{СР.ОЧ}$ – среднее время нахождения автомобиля в очереди, час; $C_{ПР.ПОСТ}$, $C_{ПР.АВТ}$ – соответственно потери прибыли из-за простоя одного поста в ожидании поступления автомобиля на ТО и потери прибыли за один автомобиле-час из-за простоя в ожидании ТО, руб./час.

Наибольшую сложность при определении данного критерия представляет достоверное определение потерь прибыли из-за простоя одного поста, поэтому предварительно рассмотрим, как влияет отношение $C_{ПР.АВТ} / C_{ПР.ПОСТ}$ на суммарные затраты $Z_{СУМ.ЧАС}$ от простоя автомобилей в ожидании обслуживания и от простоя постов зоны ТО в ожидании автомобилей на обслуживание за один час работы зоны ТО. Суммарные затраты $Z_{СУМ.ЧАС}$ за один час работы зоны ТО определялись с помощью безразмерного критерия по формуле:

$$Z_{СУМ.ЧАС} = n_{ПОСТ} \cdot (1 - K_{ИСП}) + N_{ТО1Г} \cdot \frac{T_{СР.ОЧ}}{T_{МОД}} \cdot \frac{C_{ПР.АВТ}}{C_{ПР.ПОСТ}}$$

Результаты расчета представлены на рисунке 1. Как видно из рисунка 1, по мере роста отношения $C_{ПР.АВТ} / C_{ПР.ПОСТ}$ минимальные суммарные затраты $Z_{СУМ.ЧАС}$ за один час работы зоны ТО будут достигаться при большем количестве постов в зоне ТО. При отношении $C_{ПР.АВТ} / C_{ПР.ПОСТ}$ меньше 1 оптимальным является зона ТО с 3 постами, а при отношении $C_{ПР.АВТ} / C_{ПР.ПОСТ}$ равном или больше 1 – зона ТО с 4 постами.

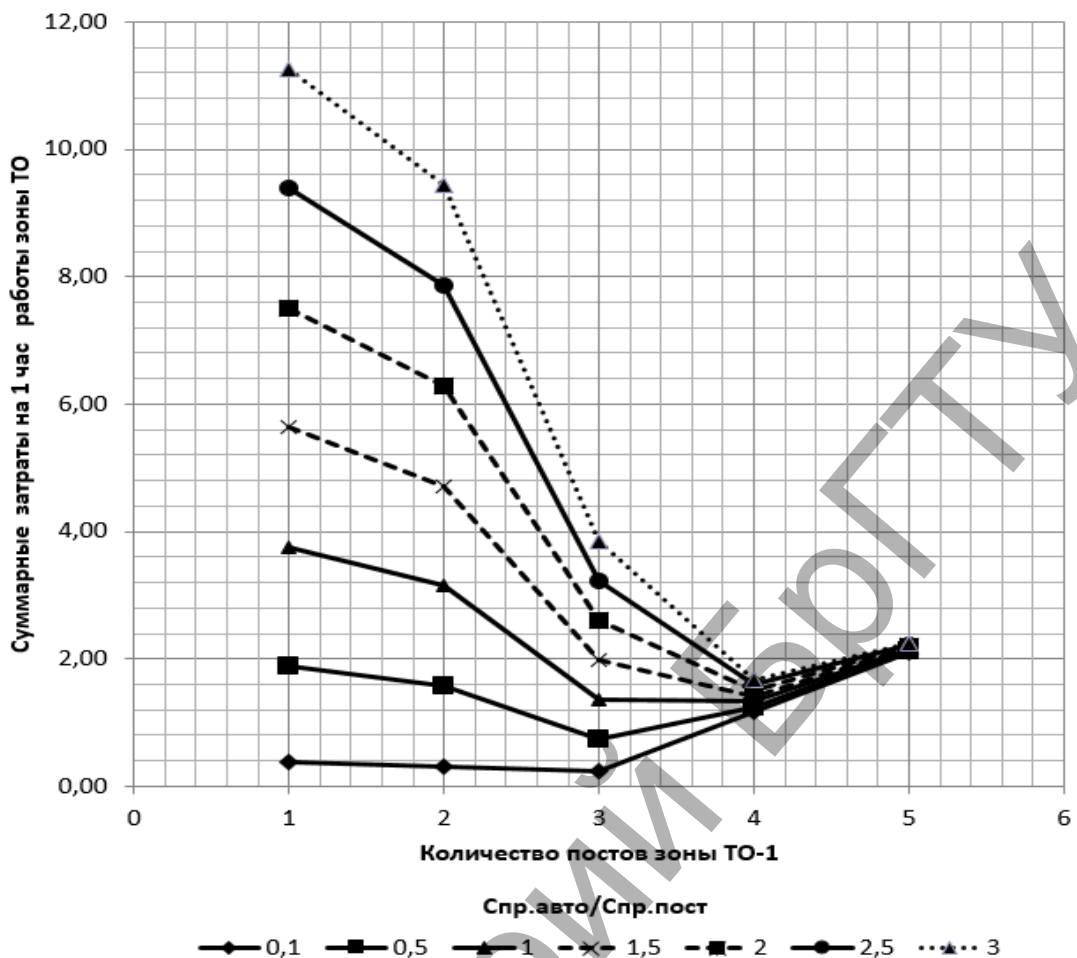


Рисунок 1 – Зависимость суммарных затрат $Z_{\text{СУМ.ЧАС}}$ от простоя автомобилей в ожидании обслуживания и от простоя постов зоны ТО в ожидании автомобилей на обслуживание за один час работы зоны ТО от отношения $C_{\text{ПР.АВТ}} / C_{\text{ПР.ПОСТ}}$ и количества постов ТО.

Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод, что для оптимизации средств обслуживания автомобилей, в частности, определения оптимального количества постов зоны ТО, необходимо достоверное определение потерь прибыли из-за простоя постов с учетом всех затрат. Так же представленная имитационная модель зоны ТО не учитывает тот факт, что постановка автомобилей на ТО осуществляется с помощью метода оперативного планирования ТО по календарному времени или по фактическому пробегу, что сокращает время ожидания прохождения ТО автомобилями.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. ТКП 248-2010 (02190). Техническое обслуживание и ремонт автомобильных транспортных средств. Нормы и правила проведения. – Мн.: РУП «БелНИИТ «Транстехника»», 2010. – 44 с.
2. Проектирование предприятий автомобильного транспорта: Учебник / М. М. Болбас, Н. М. Капустин, А. С. Савич [и др.]; Под ред. М. М. Болбаса – Мн.: Адукацыя і выхаванне, 2004. – 528 с.

СПОСОБ УТИЛИЗАЦИИ ОТРАБОТАВШИХ ВОДНЫХ РАСТВОРОВ ТЕХНИЧЕСКИХ МОЮЩИХ СРЕДСТВ

Дронченко В.А., Семенов В.И.

Полоцкий государственный университет
Новополоцк, Республика Беларусь

Разнообразные технологические процессы вспомогательного производства предполагают использование широкого ассортимента водных растворов технических моющих средств (ТМС), которые перед употреблением разводят водой. Этот факт существенно увеличивает реальную долю общего объема потребления водных растворов ТМС среди прочих продуктов, содержащих нефтепродукты и поверхностно-активных веществ (ПАВ).

Для уменьшения объема отработавших водных растворов ТМС, на многих предприятиях реализованы индивидуальные и централизованные очистные сооружения. Этот путь предполагает периодическое удаление загрязнений и добавку свежего продукта. Очистка и регенерация работающих водных растворов ТМС на месте потребления позволяет снизить их расход, устранить неприятные запахи и снизить возникновение дерматитов у обслуживающего персонала [1].

Отработавшие водные растворы ТМС, содержащие в своем составе, наряду с нефтепродуктами, значительное количество щелочных добавок и различных ПАВ, относятся к числу химических загрязнителей окружающей среды [1], которые подлежат обязательному сбору и утилизации, а в отдельных случаях – уничтожению. Сброс отработавших водных растворов ТМС или их подача в очистные устройства без предварительной обработки запрещены.

Для отработавших водных растворов ТМС наиболее рациональным признан их сбор и утилизация непосредственно на местах потребления. Это связано с необходимостью разрушения и обезвреживания больших объемов эмульсионных отходов, а также с необходимостью параллельной очистки выделяемой из отходов воды.

Перед многими промышленными предприятиями остро стоит проблема утилизации отработавших водных растворов ТМС. Это объясняется тем, что при сравнительно небольших объемах отработавших водных растворов ТМС для большинства малых и средних предприятий, установка специализированного оборудования по переработке и утилизации этих растворов, как и транспортировка отработавших водных растворов ТМС на крупные предприятия (обладающие таким оборудованием), являются экономически нецелесообразными. Для таких предприятий является перспективным поиск способов максимального применения отработавших водных растворов ТМС непосредственно на предприятии, либо на предприятиях данного региона, причем с минимальными затратами на очистку и переработку. Одним из возможных способов такого применения отработавших водных растворов ТМС является использование их вместо воды в технологии получения эмульсий на основе нефтесодержащих отходов (НСО) с помощью ударных волн, генерируемых пневматическим излуча-

телем, с последующим, использованием для различных целей, как самим предприятием, так и другими предприятиями [2–4].

Цель исследования – обоснование возможности использования отработавших водных растворов ТМС вместо воды при приготовлении эмульсии на основе НСО.

Методика определения влияния содержания отработавших водных растворов ТМС и эмульгатора в эмульсии на её стабильность представлена в [3]. Во всех экспериментальных исследованиях использовались одинаковые по первоначальному химическому составу НСО и отработавшие водные растворы ТМС. С целью повышения достоверности экспериментов в каждой серии опытов поддерживались одинаковые условия: давление в сети сжатого воздуха, частота импульсов, температура жидкости, содержание веществ, влияющих на стабильность эмульсии и время перемешивания. Стабильность приготовленной эмульсии оценивалась по количеству выделившейся воды за промежутки времени от 1 до 30 дней. Расслоение измерялось при помощи пробирок по высоте столба жидкости.

Ранее были проведены экспериментальные исследования, которые позволили определить процентное содержание воды в эмульсии на основе НСО позволяющее получить эмульсию с требуемой стабильностью [3]. Для исследования влияния содержания отработавших водных растворов ТМС и эмульгатора в эмульсии на её стабильность содержание отработавших водных растворов ТМС бралось по результатам этих исследований (для эмульсий, используемых непосредственно на предприятии, – 40 % от объема НСО; для эмульсий на продажу – 30 %), а в качестве эмульгатора использовали ТМС Лабомид 101, как показавшее лучший результат в [3].

Исследования проводились на опытно-промышленной установке по приготовлению эмульсии с помощью ударных волн, генерируемых пневматическим излучателем, на ОАО Полоцкий завод «Проммашремонт». Эмульгатор при проведении экспериментальных исследований использовался в объеме 0; 20; 40; 60; 80 и 100 процентов от объема, использованного при экспериментальных исследованиях, в которых использовались НСО и вода. Результаты проведенных экспериментов представлены на рисунках 1 и 2. Результаты исследований при содержании эмульгатора 20 % и без эмульгатора не приведены, так как в этих случаях не получилась стабильная эмульсия.

Использование вместо воды отработавших водных растворов ТМС позволяет уменьшить применение эмульгатора при сохранении требуемой стабильности эмульсии. При содержании эмульгатора 100, 80 и 60 процентов от объема эмульгатора использовавшегося при приготовлении эмульсии состоящей из 60 % НСО и 40 % воды регрессионные кривые практически совпадают (см. рисунок 1), что говорит о практически одинаковой стабильности эмульсий. Лишь при содержании эмульгатора 40 % от объема эмульгатора использовавшегося при приготовлении эмульсии состоящей из 70 % НСО и 30 % воды получается эмульсия, не обладающая требуемой стабильностью (рисунок 2).

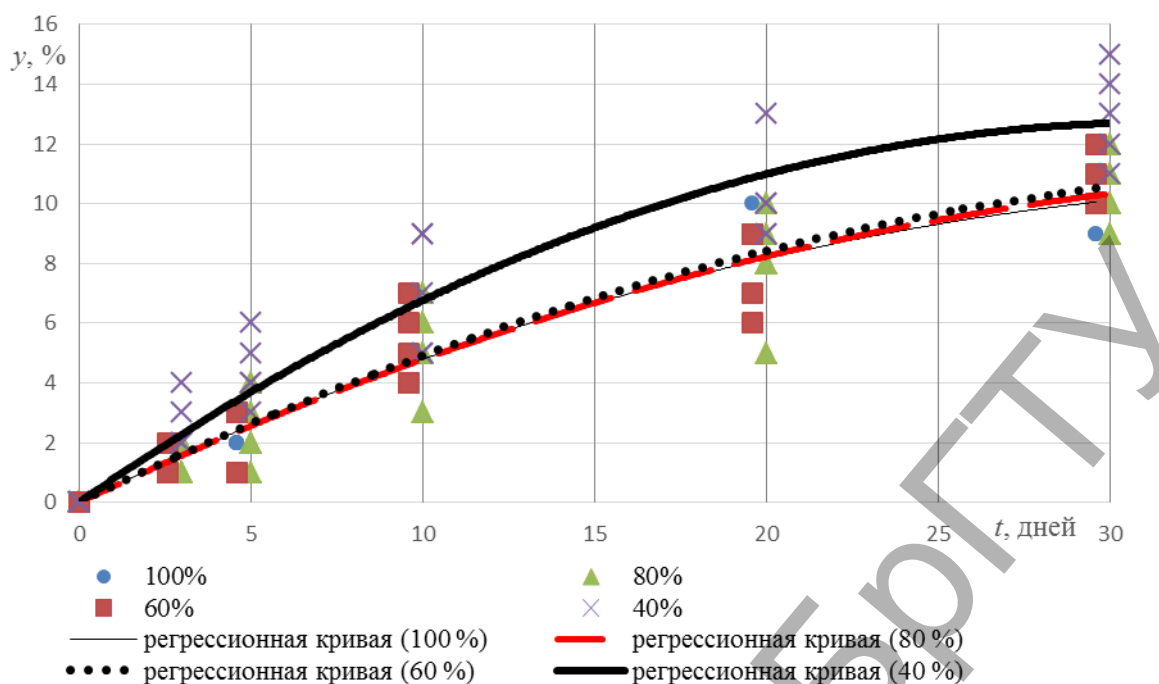


Рисунок 1 – Доля выделившейся воды из эмульсии y за время t при содержании отработавшего водного раствора ТМС в отходах 40 %. В процентах указана доля эмульгатора от исходного объема

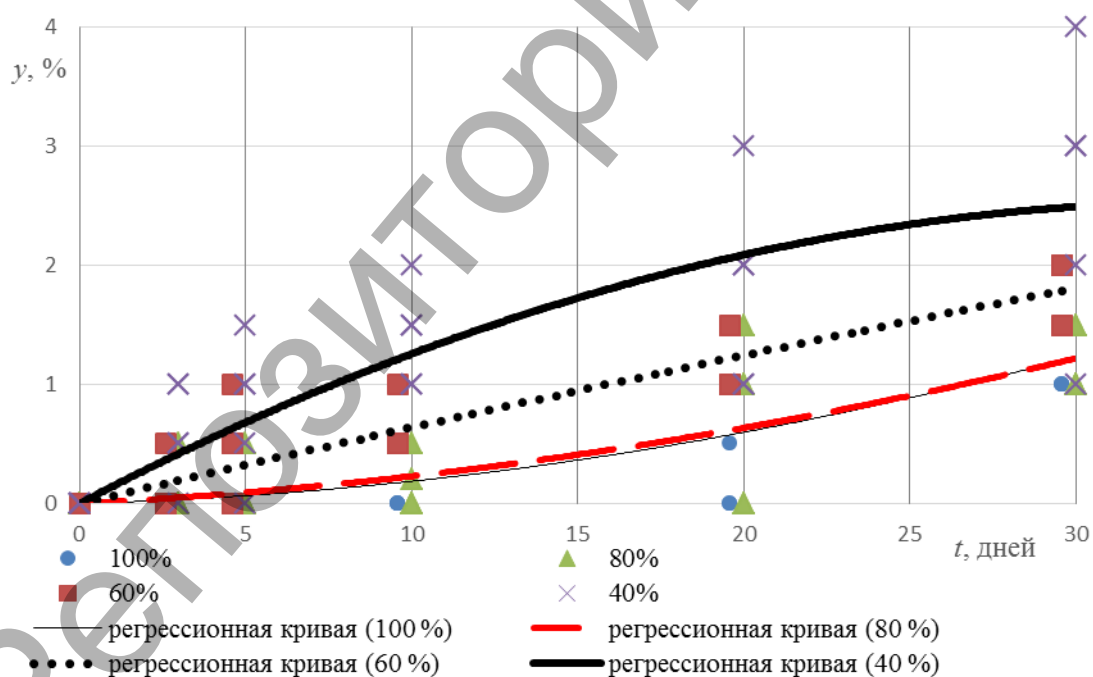


Рисунок 2 – Доля выделившейся воды из эмульсии y за время t при содержании отработавшего водного раствора ТМС в отходах 30 %. В процентах указана доля эмульгатора от исходного объема

Таким образом, при использовании вместо воды отработавших водных растворов ТМС содержание эмульгатора можно уменьшить на 40–60 %, так как отработавшие водные растворы ТМС включают ПАВ и щелочные добавки, по-

звolyающие получить эмульсию с требуемой стабильностью. Замена воды на отработавший водный раствор ТМС при производстве эмульсии оказывает положительное влияние на стабильность эмульсии.

При использовании вместо воды в эмульсии отработавших водных растворов ТМС уменьшается объем их попадания в окружающую среду на величину, объема использованного раствора, и тем самым улучшается экологическая обстановка в регионе.

Полученная эмульсия использовалась на филиале «НЖБ» ОАО «Кричевцементношифер» в качестве противoadгезионного покрытия, наносимого на поверхности форм для изготовления железобетонных изделий. Она обеспечила нормативное качество поверхностей изготавливаемых изделий при себестоимости на 30–70 % ниже, чем у промышленных эмульсий, реализуемых на рынке.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Тельнов, Н. Ф. Очистка машин и вопросы экологии / Н.Ф. Тельнов // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1996. – № 4. – С. 36–41.
2. Иванов, В.П. Утилизация сточных вод с нефтесодержащими отходами эмульгированием и сжиганием / В.П. Иванов, В.А. Дронченко // Вестник Белорус. гос. с.-х. акад. – 2015. № 4. – С.141–146.
3. Дронченко, В.А. Влияние содержания воды на стабильность эмульсии на основе отработавших нефтесодержащих продуктов / В.А. Дронченко // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В. Промышленность. Прикладные науки. – 2015. № 11. – С. 82–86.
4. Иванов, В.П. Приготовление эмульсий на основе отработавших пластичных смазок / В.П. Иванов [и др.] // Проблемы трибології, Т. 80 – 2016. № 2. – С. 63–68.

УДК 629.3.082.2

КОРРЕКТИРОВКА МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ АВТОТРАНСПОРТНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Монтик С. В., Монтик Н. С., Головач А. П.

Брестский государственный технический университет,
Брест, Республика Беларусь.

Завершающей стадией технологического проектирования автотранспортных предприятий (АТП) является анализ технико-экономических показателей (ТЭП), который проводится с целью выявления степени технического совершенства и экономической целесообразности разработанных проектных решений. Кроме оценки проектов, технико-экономические показатели используются для выполнения укрупненных расчетов при выборе путей развития и совершенствования производственно-технической базы предприятий, при определении необходимости и целесообразности расширения и реконструкции АТП.

Эффективность проекта оценивается путем сравнения его технико-экономических показателей с нормативными (эталонными) показателями, а также с показателями аналогичных проектов и передовых действующих предприятий. Номенклатура показателей для оценки проектов АТП достаточно большая и наряду с технологическими показателями и строительно-планировочными включает

показатели стоимости строительства, уровня рентабельности, сроков окупаемости капитальных вложений и ряд других.

Рассмотрим далее методику оценки технико-экономических показателей технологического проектирования АТП, которая используется в учебном процессе ввиду доступности и низкой трудоемкости, а также выполним ее анализ с точки зрения соответствия современному подвижному составу.

Для оценки результатов технологического проектирования Гипроавтотрансом [1] разработаны технико-экономические показатели для различных предприятий автомобильного транспорта. Для автономных АТП установлены следующие ТЭП: число производственных рабочих и рабочих постов на 1 автомобиль, площадь производственно-складских, административно-бытовых помещений на 1 автомобиль, площадь стоянки на 1 место хранения, площадь территории предприятия на 1 автомобиль.

ТЭП представляют собой удельные значения нормативов численности производственных рабочих (штатных), постов, площадей производственных и административно-бытовых помещений на единицу подвижного состава (ПС) для наиболее характерных (эталонных) условий: списочное число технологически совместимого подвижного состава – 300 единиц; климатический район – умеренный; категория условий эксплуатации – I; среднесуточный пробег – 250 км; условия хранения – открытая стоянка без подогрева при 50% независимого выезда автомобилей по углом 90°; водоснабжение, теплоснабжение, электроснабжение – от городских сетей [1].

При этом в качестве базовых (эталонных) моделей принимались: для грузовых автомобилей - КамАЗ-5320; для автобусов - ЛиАЗ-5256 [1].

Для автотранспортных предприятий, условия эксплуатации и размер которых, отличаются от эталонных, определение показателей производится с помощью коэффициентов, которые учитывают влияние следующих факторов: списочное число технологически совместимого подвижного состава, тип подвижного состава, наличие прицепного состава к грузовым автомобилям, среднесуточный пробег подвижного состава, условия хранения, категория условий эксплуатации, климатический район.

Значения приведенных удельных технико-экономических показателей для условий проектируемого предприятия определяются умножением удельного показателя для эталонных условий на соответствующие коэффициенты, учитывающие отличие конкретных условий от эталонных.

Абсолютные значения нормативных показателей определяются произведением соответствующего приведенного удельного показателя на списочное число подвижного состава, одинакового по классу или грузоподъемности.

Значения технико-экономических показателей работы проектируемого АТП не должны превышать приведенных эталонных. В противном случае необходимо пересмотреть принятые проектные решения.

Существенным недостатком методики [1] является то, что в качестве эталонных моделей грузовых автомобилей и автобусов используются устаревшие модели подвижного состава. Нормативная трудоемкость технического обслуживания

(ТО) и текущего ремонта (ТР), нормативные пробеги до ТО и списания данного ПС значительно отличаются от современного подвижного состава [2].

Выполним оценку изменения годового объема работ по ТО и ТР современных грузовых автомобилей и автобусов производства ОАО «Минский автомобильный завод» по сравнению с базовыми (эталонными) моделями, используемыми в методике [1]. Для этого определяем годовой объем работ по ТО и ТР грузовых автомобилей КамАЗ-5320 и МАЗ-53371, а также автобусов ЛиАЗ-5256 и МАЗ-1034. Условия работы ПС: списочное число технологически совместимого подвижного состава – 300 единиц; климатический район – умеренный; категория условий эксплуатации – I; среднесуточный пробег – 250 км.

Годовой объем работ по ТО и ТР составил: автобусы МАЗ-1034 – 501993,3 чел.-ч., ЛиАЗ-5256 – 354249,2 чел.-ч.; грузовые автомобили МАЗ-53371 – 176038,4 чел.-ч., КамАЗ-5320 – 252894,1 чел.-ч. Как видно из приведенных результатов, годовой объем работ по ТО и ТР автобуса МАЗ-1034 на 41,7% больше, чем для автобуса ЛиАЗ-5256, а для грузового автомобиля МАЗ-53371 на 30,4% меньше, чем для КамАЗ-5320.

Исходя из этого, предлагается при оценке проектов пассажирских АТП, которые используют автобусы МАЗ, увеличить на 41,7% такие удельные эталонные ТЭП как число производственных рабочих и количество рабочих постов на 1 автомобиль, т. к. увеличение данных показателей пропорционально росту годового объема работ по ТО и ТР для автобусов МАЗ по сравнению с ранее используемыми в методике [1] базовыми (эталонными) моделями автобусов.

Также целесообразно увеличить удельную эталонную площадь производственно-складских помещений на единицу ПС, однако величина корректировки данного показателя требует дальнейших исследований, т. к. площадь складов зависит от количества ПС, а площадь производственных зон и участков – от количества работающих на участках и количества рабочих постов и постов ожидания.

Рассмотренная выше методика оценки ТЭП технологического проектирования АТП не учитывают всех экономических показателей, которые необходимо определить при строительстве или реконструкции АТП, поэтому эти методики возможно использовать либо на стадии технологического проектирования либо в учебном процессе.

Предложенные выше рекомендации по оценке ТЭП технологического проектирования АТП внедрены в учебный процесс и используются студентами специальности 1 – 37 01 06 «Техническая эксплуатация автомобилей» при выполнении курсового проекта по дисциплине «Проектирование предприятий автомобильного транспорта и автосервиса» и дипломного проекта.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Напольский, Г. М. Технологическое проектирование автотранспортных предприятий и станций технического обслуживания: Учебник для вузов. – М.: Транспорт, 1993. – 271 с.

2. ТКП 248-2010 (02190). Техническое обслуживание и ремонт автомобильных транспортных средств. Нормы и правила проведения. – Мн.: РУП «БелНИИТ «Транстехника»», 2010. – 44 с.

МЕХАНИЧЕСКИЕ ПРИВОДЫ НА БАЗЕ ВОЛНОВЫХ ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧ

Санюкевич Ф.М.

Брестский государственный технический университет
Брест, Республика Беларусь

Применение в механических приводах волновых зубчатых передач обеспечивает значительное уменьшение габаритов и массы этих.

На рисунках 1 и 2 приведены примеры таких конструкций, разработанные автором совместно с В.И. Тростиным.

На рис. 1 показан механизм подъёма груза с приводом от двигателя АИР 112 МВ8. Предлагаемая конструкция механизма базируется на волновом зубчатом редукторе, фланец-стакан 1 которого крепится к кронштейну 2, закреплённому на раме 3. Гибкое колесо 4 с помощью шлицев соединено с диском 5. Последний в свою очередь жестко соединён с помощью винтов и штифтов с неподвижным фланцем 1. Жесткое колесо установлено на крышке 7 и соединено с ней посредством винтов. При этом вращение кулачкового генератора волн, состоящего из кулачка 8 и напрессованного на него специального гибкого подшипника 9, вызывает вращение колеса 6, а значит, и связанного с ним барабана 10 (диаметр барабана 460 мм). Барабан 10 опирается на два радиальных шарикоподшипника 11. Вал 12 генератора опирается на радиальные шарикоподшипники 13 и 14 и жестко соединён с валом двигателя 15, прикрепленного посредством шпилек к кронштейну 2. С целью уменьшения напряжений во впадинах между зубьями гибкого колеса, неравномерности распределения нагрузки на зуб по ширине зубчатого венца и между зонами зацепления, нагрузки на генератор волн и повышения КПД, надёжности и долговечности редуктора предусмотрено: применение кулачкового генератора, лучше другого генератора сохраняющего под нагрузкой принятую форму деформирования гибкого колеса; расположение генератора посередине зубчатого венца; деформирование гибкого колеса по форме кольца, растянутого четырьмя силами, расположенными под углом 25° к большей оси генератора (овала деформирования). В соединении диска 5 с гибким колесом 4 предусмотрен зазор 2,5 мм, обеспечивающий колесу осевую подвижность в работающей передаче. Это снижает напряжение в гибком колесе. Дальнейшему его перемещению препятствуют диски 16 и 17. Передаточное отношение данного волнового редуктора при неподвижном гибком колесе $i_{hb}^g = 202$. Число волн деформирования гибкого колеса $U=2$. Коэффициент числа зубьев $Y_z=1$. Числа зубьев колёс: гибкого $Z_g=402$, жесткого $Z_b=404$. Модуль зацепления $m=0,6$ мм. Угол исходного контура инструмента $\alpha=20^\circ$. Величина радиального перемещения гибкого колеса вдоль большей оси генератора $\omega b=m=0,6$ мм. Внутренний диаметр гибкого колеса $d_k=240$ мм, его длина $l=0,8d_k=192$ мм. Толщина гибкого колеса: по впадине между зубьями $\delta=0,0125d_k=3$ мм, гладкой части $\delta_l=0,6\delta=1,8$ мм. Материал гибкого и жесткого колёс – сталь 45, термообработка – улучшение (твёрдость 28...32 HRC_s). Нор-

мально-замкнутый колодочный тормоз 20 устанавливается на кронштейне 18, прикреплённом к лапам двигателя 15. Крышка – зубчатое колесо 21, прикрепляемое к барабану 10, зацепляется с шестерней ограничителя 22 подъёма и опускания груза.

Предлагаемая конструкция механизма подъема может быть использована при загрузке станков.

На рис. 2 приведена конструкция привода двухцепного конвейера на базе волновой передачи. Двигатель 12 привода (АИР 160М6) крепится к кронштейну 14, который в свою очередь, как и волновой редуктор, прикреплён к раме 15, установленной между грузовой и холостой ветвями конвейера (на рис. 2 дан вид сверху на предлагаемый привод). Редуктор расположен симметрично относительно звёздочек 10 для тяговых пластинчатых цепей, поэтому принято его симметричное исполнение с двусторонним отбором мощности на выходе. Для сокращения осевых габаритов и увеличения его крутильной жёсткости, гибкое колесо 6 выполнено коротким в виде кольца с одним внешним зубчатым венцом (на рис. 2 зачернено). При деформировании генератором гибкого колеса его зубья входят в зацепление одновременно с неподвижным жестким колесом 7 и ведомыми зубчатыми полумуфтами 3. При этом гибкое и жесткое колеса образуют волновое зацепление, а полумуфты – волновые зубчатые муфты. Жесткое колесо посажено на посадке H7/k6 в корпус 4 редуктора и прикреплено к нему болтами. Для предохранения зацепления от изменения зазоров предусмотрены конические штифты. Каждая из полумуфт опирается на два подшипника 8, смонтированных в крышках 9. Передача момента нагрузки с полумуфт звёздочкам 10 осуществляется шлицевым соединением. В редукторе предусмотрен трехдисковый (двухволновой) генератор, состоящий из дисков 16, 17 и 18, эксцентриковых втулок 20, 21 и 23 и вала 13.

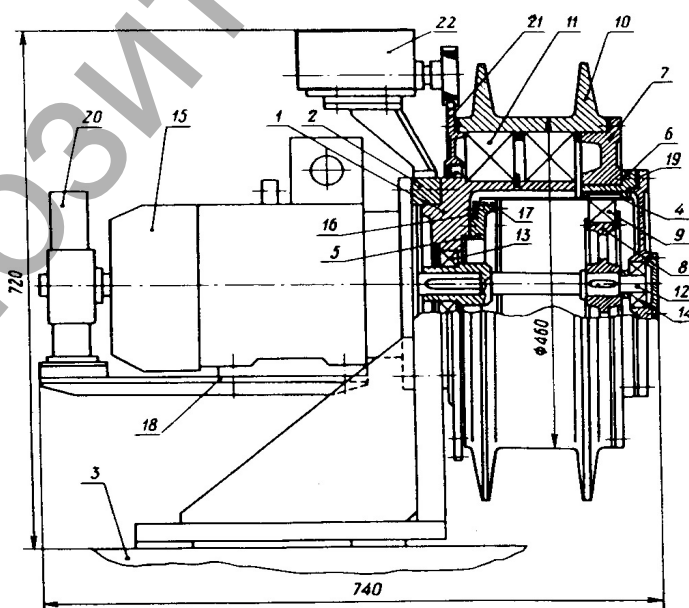


Рисунок 1. Механизм подъема груза

Каждый из дисков установлен на однорядном шарикоподшипнике. Втулки соединены с валом шлицами и установлены так, что обеспечивают смещение осей крайних и центрального дисков на величину $2e$ (e – эксцентриситет генератора). Вал опирается на шарикоподшипники 1, установленные в гнездах полумуфт 3. Осевому перемещению втулок вместе с дисками генератора препятствуют кольца 22, расположенные с обеих сторон крайних втулок и фиксируемые относительно вала стопорными кольцами. Для предохранения внутренней поверхности гибкого колеса от раскатывания дисками генератора и увеличения цилиндрической жесткости гибкого колеса предусмотрено подкладное кольцо 5. Осевому перемещению подкладного кольца и гибкого колеса препятствуют полумуфты 3. Отверстие 19 в левой полумуфте, закрываемое крышкой 2, может быть использовано при установке двигателя 12 с левой стороны или, при необходимости, тормоза (для этой цели предусматривают для вала 13 левый консольный участок). Вращение от вала двигателя 12 валу 13 передается через втулочную муфту 11. Передаточное отношение волнового редуктора при неподвижном жестком колесе: $i_{hb}^g = 250$, число волн деформирования гибкого колеса $U=2$ (число зон зацепления), коэффициент числа зубьев $Y_z=1$. Число зубьев колёс: гибкого $z_g=500$, жесткого $z_b=502$, модуль зацепления $m=2,5$ мм, угол исходного контура инструмента $\alpha=20^\circ$.

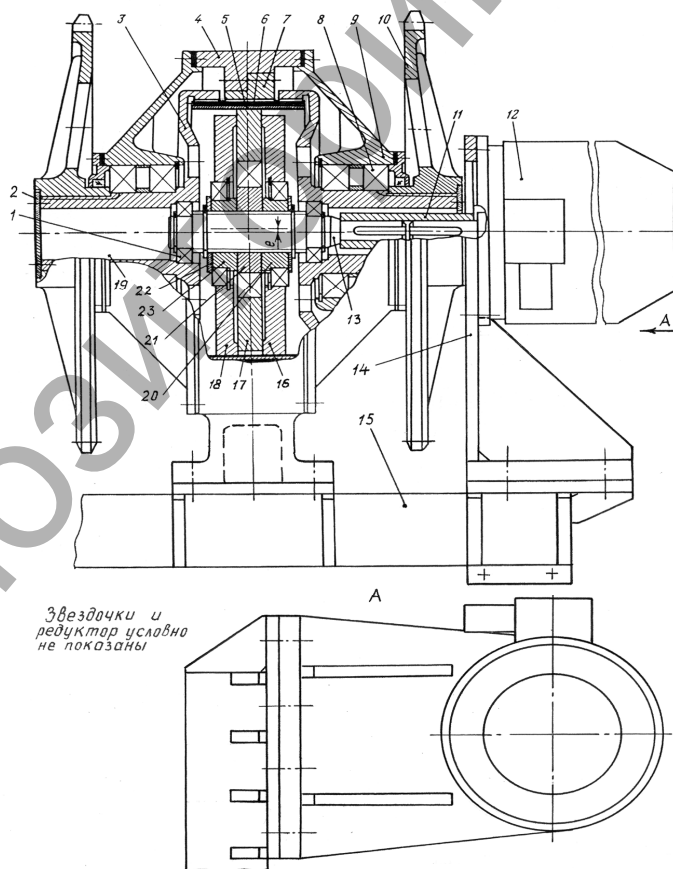


Рисунок 2. Привод двухцепного конвейера

Величина радиального перемещения гибкого колеса вдоль большой оси генератора $\omega = m = 2,5$ мм, эксцентриситет втулок $e = 9$ мм, угол обхвата дисков генератора гибким колесом 30° . Внутренний диаметр гибкого колеса $d_k = 480$ мм, его длина $l = 0,375d_k = 180$ мм. Материал гибкого и жесткого колёс – сталь 45, термообработка – улучшение (твёрдость 28...32 HRC₃).

Применение волновых передач в приводах позволяет, кроме уменьшения габаритов привода и его массы, повысить способность к кратковременным перегрузкам, обеспечить вследствие симметрии конструкции (рис.2) уравновешенность системы и равнонагруженность её элементов, малые нагрузки на валы и опоры, повысить технологичность привода, снизить дополнительные динамические нагрузки в приводе при реверсивной работе и шум вследствие малого изнашивания зубьев, связанного с малыми скоростями скольжения в зацеплении, и большого числа зубьев в одновременном зацеплении. Предлагаемые приводы будут обладать достаточно высокими КПД, нагрузочной способностью, надежностью и долговечностью.

УДК 62.529

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СРЕДЫ MS EXCEL ПРИ СОСТАВЛЕНИИ ОПЕРАТИВНО-СУТОЧНОГО ПЛАНА ТЕКУЩЕГО РЕМОНТА ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

Концевич П.С., Волощук А.А.

Брестский государственный технический университет
Брест, Республика Беларусь

Процесс оперативно-производственного управления текущим ремонтом (ТР) транспортных средств (ТС) состоит из комплекса операций, выполняющихся в определенной последовательности и составляющих замкнутый технологический цикл, и имеет целью обеспечение выполнения заданий по ТР ТС 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].

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 выполне-

ния отдельных видов работ, содержащихся в диспетчерской характеристике рассматриваемого требования.

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 (дооформляет) правильность занесения и шифровки исходных данных по ТС 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.

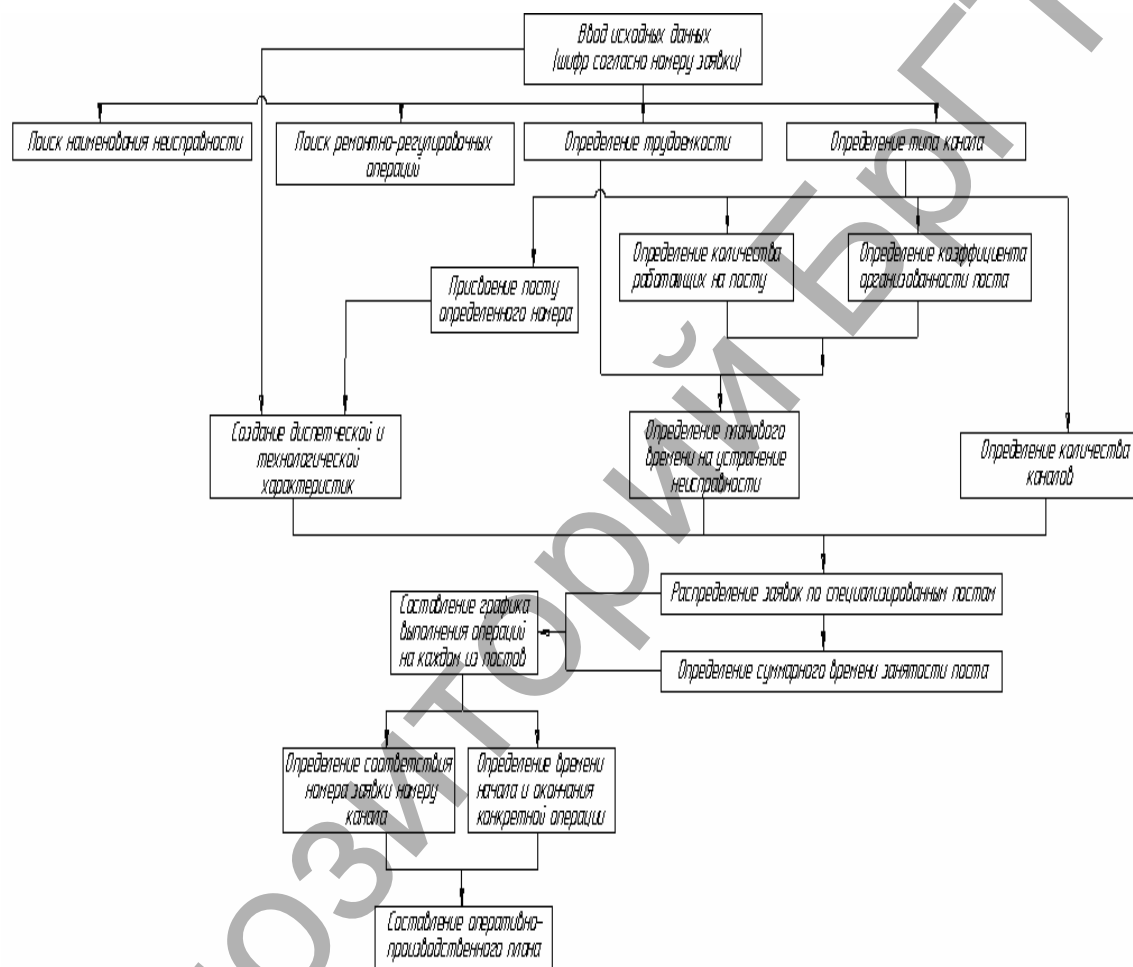


Рисунок 2 - Алгоритм программы

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 определяется 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.

На основании исходных данных (в данном случае номера заявки в соответствии с порядком поступления ТС 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 ТС 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 подвижного состава (ПС) в зоне ожидания, а также простои постов.

По результатам расстановки высчитывается суммарное время занятости поста, а затем составляется график ТР, в котором указывается распределение планового времени в соответствии с порядком постановки ТС 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.

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 ТР;
- 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.

Это в свою очередь повысит производительность труда, сократит время ремонта ТС на постах, повысит точность обработки и анализа информации, в значительной степени облегчит принятие управленческих решений.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Кузнецов, Е.С. Техническая эксплуатация автомобилей: Учебник для вузов. 4-е изд., перераб. и дополн. / Е.С. Кузнецов, А.П. Болдин, В.М. Власов и др. – М.: Наука. – 2004. – 535 с.
2. Орвис, В. Excel для ученых, инженеров и студентов / В. Орвис – М.: Юниор. – 1999. – 528 с.

УДК 621.693

АНАЛИЗ ПРЕДРЕМОНТНОГО СОСТОЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ВОССТАНАВЛИВАЕМЫХ КОЛЕНЧАТЫХ ВАЛОВ

Иванов В.П., Вигерина Т.В.

Полоцкий государственный университет, Республика Беларусь

Основными причинами, объясняющими необходимость ремонта машин, являются изнашивание и усталостное разрушение деталей, работающих в услови-

ях воздействия периодических нагрузок. К типичным высоконагруженным деталям, требующим увеличения износостойкости и усталостной прочности, относятся коленчатые валы двигателей внутреннего сгорания. При потере работоспособности коленчатыми валами возникает необходимость их восстановления, так как они относятся к металлоемким и дорогостоящим деталям, замена которых новыми изделиями экономически нецелесообразна [1].

Важнейшие восстанавливаемые геометрические параметры коленчатых валов – это диаметры коренных и шатунных шеек, а также соосность коренных шеек. Для оценки объема восстановительных работ необходимо знать предремонтное состояние этих параметров, поэтому целью данной работы являлось проведение исследований по определению износа шеек коленчатых валов двигателей ЗМЗ-53-11 и ГАЗ-52-04, а также несоосности коренных шеек этих деталей [2, 3].

Минимальные объемы выборок n деталей определяли в соответствии с ГОСТ 17510 при точности $\beta = 5\%$ и вероятности 0,95.

Износ (отклонение от доремонтного размера) шеек валов определялся по наиболее изношенной шейке в направлении наибольшего износа с помощью микрометров МК 50-75 ГОСТ 6507-90. Отклонение от соосности средней коренной шейки вала относительно крайних измерялось на заводском индикаторном стенде.

Сведения об измерениях изображались в виде эмпирических полигонов распределений (рисунок 1), к каждому из которых подбирался один из наиболее близких теоретических законов распределения из числа: нормального, Вейбулла, показательного, Релея и гамма-распределения. Соответствие теоретических распределений данным экспериментов определялось с помощью критерия Пирсона χ^2 .

Оказалось, что изучаемые параметры близко описываются законом Вейбулла, за исключением износа шатунных шеек двигателей ЗМЗ-53-11, который лучше описывается показательным законом.

Анализ показал, что наиболее распространенное повреждение деталей данного класса – естественный износ шеек, среднее значение которого находится в пределах 30–90 мкм, а максимальное не превышает 200 мкм. Наибольшее значение износа наблюдается на валах после схватывания шеек с вкладышами (аварийный износ). Как правило, коренные шейки изнашиваются интенсивнее шатунных в 1,3–1,5 раза. Больше изношены задние коренные шейки и передние шатунные шейки. 70–75 % валов вышли из ремонтных размеров и требуют наплавки.

В капитальный ремонт направляют преимущественно те двигатели, коленчатые валы которых существенно изношены и требуют нанесения покрытий. Недопустимую несоосность коренных шеек имеют 5–10 % валов. Средняя несоосность коренных шеек находится в пределах 0,03–0,05 мм. Предельная несоосность шеек обусловлена их заклиниванием в шатунных или коренных подшипниках. При схватывании валов в подшипниках наблюдаются цвета побежалости, что свидетельствует о снижении твердости поверхностного слоя.

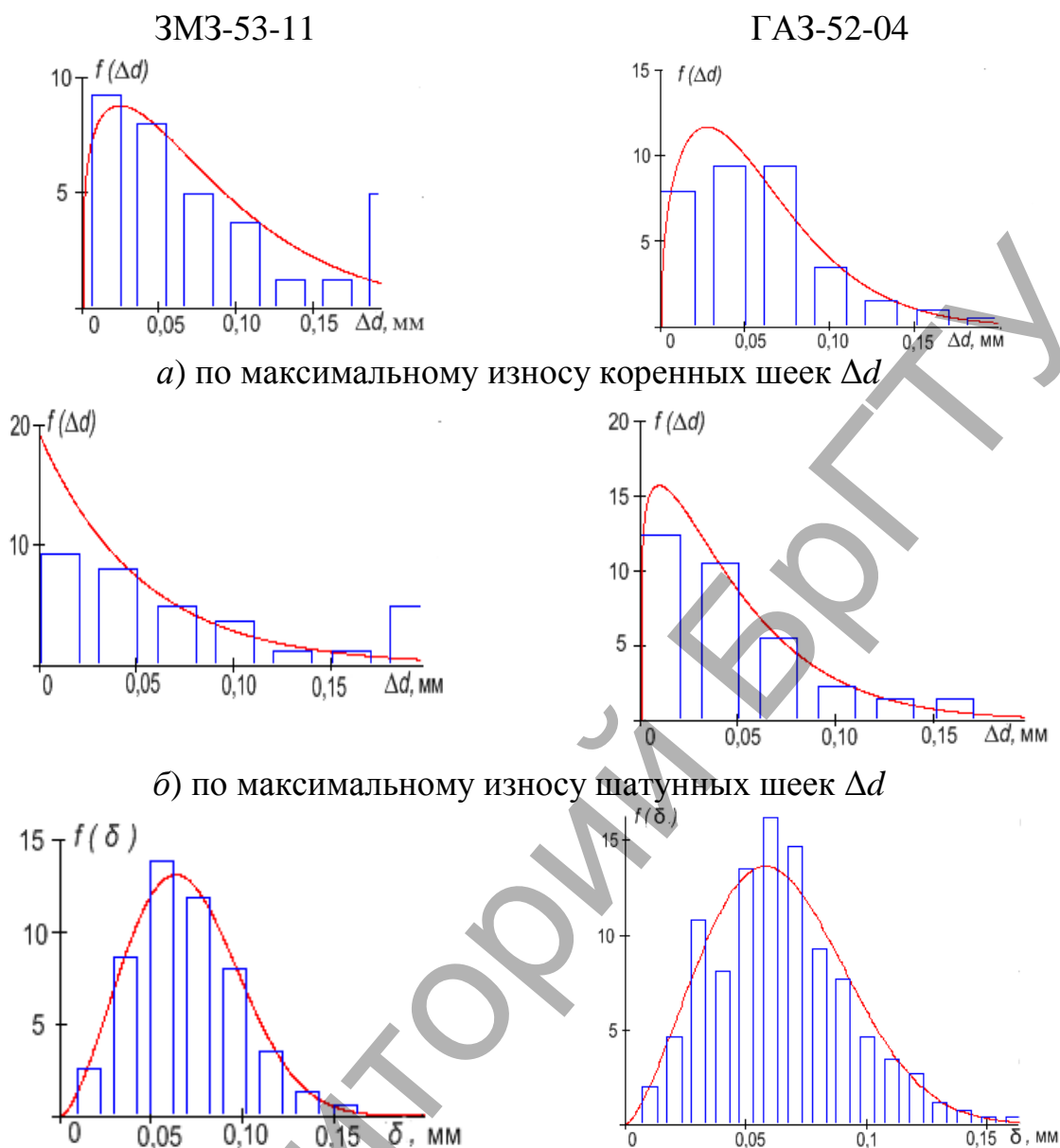


Рисунок 1 – Полигоны и плотности вероятности распределений $f(\Delta d)$ и $f(\delta)$ коленчатых валов по отклонению параметров от номинальных значений

Если не выполнять упрочняющую обработку, то валы с такими шейками в будущем после обработки под ремонтные размеры повторно претерпят схватывание с заеданием. Валы, которые претерпели схватывание и заедание, требуют шлифования через 2–3 ремонтных размера или наплавки с последующей обработкой под номинальный размер. При этом наплавки одной шейки требуют 78 % от всех наплавляемых валов, 22 % – двух шеек и 0,4 % – валов 3–5 шеек.

От 2 до 4 % коленчатых валов поступают в составе двигателей уже изломанными, а 1 % – с «подрезанными» галтелями. В ремонт могут поступать двигатели, износ коленчатых валов у которых инструментальными измерениями практически не ощущается (от 4 до 20 %). Для таких валов достаточно лишь полирование шеек.

Анализ восстанавливаемых диаметров коренных и шатунных шеек коленчатых валов и соосности коренных шеек показал, что эти параметры близко описываются законом Вейбулла, за исключением износа шатунных шеек двигателей ЗМЗ-53-11, который лучше описывается показательным законом. Наиболее распространенными повреждениями коленчатых валов является естественный износ шеек, среднее значение которого находится в пределах 30–90 мкм, а максимальное не превышает 200 мкм. Более интенсивный износ возникает на коренных шейках. Недопустимую несоосность коренных шеек имеют 5–10 % валов. Полученные закономерности позволяют прогнозировать и более точно определять объем восстановительных работ.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Иванов, В.П. Технология и оборудование восстановления деталей машин / В.П. Иванов. – Минск: Техноперспектива, 2007. – 458 с.
2. Вигерина, Т.В. Техническое состояние коленчатых валов из высокопрочного чугуна и выбор материала для их восстановления / Т.В. Вигерина // Наука и техника. – 2013. – № 2. – С. 18–22.
3. Иванов, В.П. Повышение качества восстановления коленчатых валов / В.П. Иванов, Т.В. Вигерина // Тракторы и автомобили: материалы VI междунар. науч.-практ. конф., Горки, 24 – 25 сент. 2009 г.; БСХА. – Горки, 2009. – С. 116–122.

УДК 621.8

ПОВЫШЕНИЕ ЖАРОСТОЙКОСТИ МЕДИ ДИФфуЗИОННЫМ АЛИТИРОВАНИЕМ И СИЛИЦИРОВАНИЕМ

Дашкевич В.Г.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Известно, что одним из наиболее рациональных способов защиты от высокотемпературной коррозии металлов, в том числе меди, при температурах до 800...850 °С является термодиффузионное насыщение элементами образующими при окислении плотные, устойчивые оксидные слои, например насыщение такими элементами как алюминий и кремний [1, 2].

Целью настоящей работы подтверждение эффективности применения силицирования и алитирования для повышения жаростойкости медных изделий и выявления особенностей повреждений в результате высокотемпературной коррозии.

Эффективность алитирования и силицирования была отмечена ранее проведенными работами [2, 3 и др.], однако в каждом конкретном случае для определенной толщины и состава полученного диффузионного слоя определяются свои количественные характеристики стойкости, а также особенности механизма защитного действия и разрушения, особенно в условиях циклических режимов нагрева и охлаждения.

Для насыщения меди марки М1 применяли порошковый метод, для алитирования смесь была приготовлена на основе алюминия марки ПА-2 по ГОСТ 5494 с добавкой инертной наполнителя (окись алюминия – Al_2O_3 , ГОСТ 3136) и

активатора (аммоний хлористый – NH_4Cl , ГОСТ 2210), для силицирования в качестве активной составляющей смеси был выбран ферросилиций марки ФС-70 ГОСТ 1415-93.

Испытания на жаростойкость проводили в статических условиях при температуре $800\text{ }^\circ\text{C}$, на воздухе, в течение 25 ч, циклами по 3...6 часов каждый. Измерения жаростойкости проводились весовым методом, который заключался в определении увеличения массы (привеса) образца в процессе испытаний, подвергающегося коррозии. Нагрев производили в печи СНОЛ 1,6.2,5.1/11-И2.

Установлено, что при насыщении алюминием на поверхности образуется диффузионный слой (рисунок 1, а) в котором отчетливо видны три зоны: ближе к поверхности твердый раствор толщиной около 5...10 мкм, глубже – комплекс алюминидных фаз, это твердые растворы на основе соединения CuAl_2 и, предположительно, Cu_9Al_4 общей толщиной 35...40 мкм, а также переходная зона (до 8 % Al масс.) представляющая собой α -фазу толщиной 10...20 мкм [3].

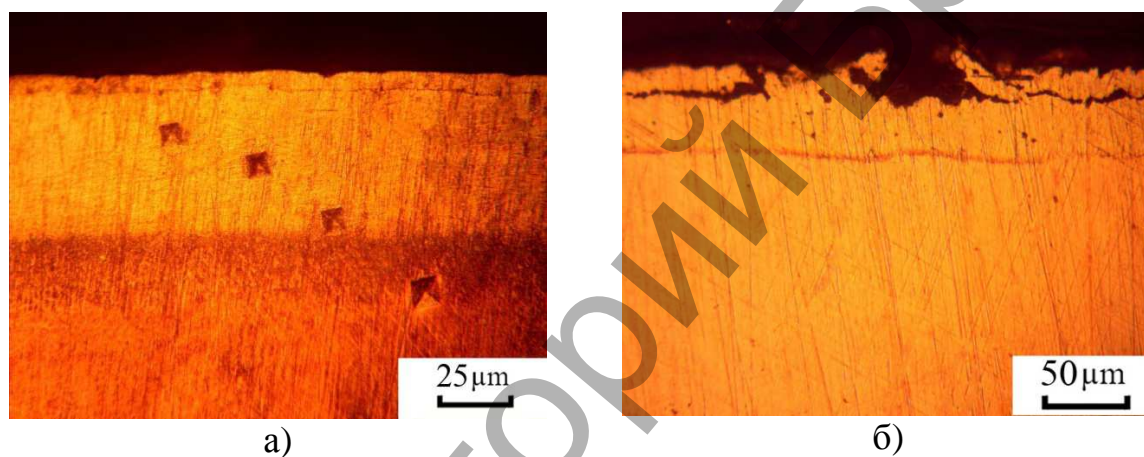


Рисунок 1 – Микроструктура алитированного и силицированного слоя на меди

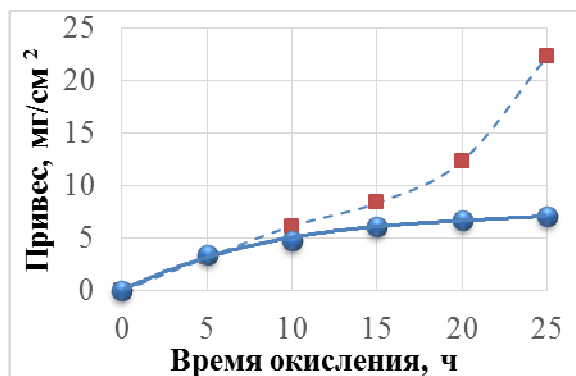
Толщина алитированного слоя за 4 часа обработки (без учета времени на прогрев контейнера) составила около 50 мкм. Микротвердость фаз после алитирования основной части диффузионного слоя изменяется незначительно, средняя величина составляет 550 МПа.

Для диффузионного слоя полученного после силицирования характерны также три зоны (рисунок 1, б), у поверхности, предположительно, зона ϵ -фазы которая образуется по перитектоидной реакции при $800\text{ }^\circ\text{C}$ и существует в узкой концентрационной области (10,6... 10,7% масс. Si), далее зона γ -фазы и α твердого раствора на основе меди (до 3,5 % масс. Si). Толщина силицированного слоя за 4 часа обработки составила около 60 мкм.

Результаты исследования жаростойкости представлены зависимостью привеса алитированных и силицированных образцов меди от продолжительности окисления на воздухе при температуре $800\text{ }^\circ\text{C}$ (рисунок 2, а).

Для выявления механизма защитного действия алитированного и силицированного диффузионных слоев были изучены микроструктуры до окисления и после. Установлено, что на алитированных образцах при испытаниях на жаро-

стойкость происходит рост толщины слоя вглубь детали и перераспределение концентрации алюминия (так называемое рассасывание слоя). За 25 ч испытательный слой увеличился на 10...20 %. Такое перераспределение приводит к заметному обеднению поверхностных слоев алюминием. Для силицированных медных образцов при испытаниях длительностью более 15 часов отмечено появление участков отслаивания диффузионного слоя (вспучивания) (рисунок 2, б).



а)

б) ×500

Рисунок 2 – Зависимость привеса алитированных и силицированных образцов меди от продолжительности окисления на воздухе при температуре 800 °С (а) и микроструктура участка силицированного слоя после испытаний (б)

Сопоставление результатов после испытаний на жаростойкость в течение 25 ч алитированных, силицированных слоев и исходных образцов технической меди свидетельствует об увеличении их стойкости в 8...12 раз для алитированных, в 3...4 раза для силицированных слоев относительно неупрочненных медных. Относительно алитированных слоев, силицированные оказались менее устойчивы в условиях циклических режимов нагрева и охлаждения, отмечено отслаивание участков (вспучивание) слоя при длительности испытаний более 15 ч.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Минкевич, А.Н. Химико-термическая обработка металлов и сплавов / А.Н. Минкевич. – М.: Машиностроение, 1965. – 491 с.
2. Коломыцев, П.Т. Жаростойкие диффузионные покрытия / П.Т. Коломыцев. – М.: Металлургия, 1979. – 272 с.
3. Гордеева, Л.Т. Окисление меди при высоких температурах и повышение ее жаростойкости алитированием / Л.Т. Гордеева, Н.Г. Вавиловская, Г.В. Григорян // Защитные покрытия на металлах. – 1968. – № 1. – С. 111 – 113.

СОДЕРЖАНИЕ

УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ, АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА, ПРОМЫШЛЕННАЯ РОБОТОТЕХНИКА

Ширвель П.И., Чигарев А.В., Конон И.И.

Проектирование мультикоптерного летательного аппарата 4

Чигарев А.В., Ширвель П.И., Конон И.И.

Разработка механо-математической модели динамики мультикоптера 7

Прокопня О.Н., Никонов М.Н.

Управление движением мобильных роботов при автоматизации складов 11

Овцов С. А., Карпович Д. С., Сарака В. В.

Разработка оптимального режима перемещения робота-манипулятора
в гальванической линии 15

Шуленков Р.А.

Разработка системы управления технологическими процессами
С динамической масштабируемой архитектурой на основе схем
С программируемой логикой 18

Здор Г.Н., Садоменко С.Л., Лившиц Ю.Е.

Программный модуль оптимизации энергопотребления
промышленных объектов 21

Вабищевич Л.И., Ярошевич А.В.

Моделирование датчика разности фаз для автоматической
системы компенсации потерь электроэнергии 24

Литвиненко М.А., Клютко М., Карпович Д.С., Лихавицкий В.В.

Моделирование тепловых объектов с распределенными параметрами 28

Кобринец В. П., Пронин Д. Н.

Математическое моделирование процесса сушки в барабанных
сушилках, как объекта управления 30

Гринюк Д.А., Сухорукова И.Г., Марозова М.П., Оробей И.О.

Подход к моделированию систем с распределенными параметрами 34

Покатилов А.Е., Киркор М.А., Ильенков И.В.

Современные методы исследования в робототехнике и биомеханике 37

Покатилов А.Е., Киркор М.А.

Компьютерные технологии расчета кинематических цепей 40

Михальков С.Л., Массальский М.И., Ширвель П.И.

Конструирование многоцелевого образовательного робота
для проведения исследований в области мехатроники,
робототехники и биомеханики 43

НАДЕЖНОСТЬ, ДИАГНОСТИКА И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ МАШИН. ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ

Антонюк В.Е., Скороходов А.С., Александрова В.С., Драган А.В. Разработка объективного метода контроля виброакустических характеристик зубчатых передач	48
Медведев О.А., Олехник М.А. Определение допусков звеньев угловых размерных цепей машин при неполной взаимозаменяемости деталей	51
Басинюк В.Л. Оценка опасных состояний и рисков мехатронных систем техники для экстремальных условий эксплуатации	54
Антонюк В.Е., Басинюк В.Л., Ярошевич Е. Разработка технологии динамической стабилизации для дисков трения тяжелых транспортных машин	58
Ишин Н.Н., Гоман А.М., Скороходов А.С., Натурьева М.К., Драган А.В. Виброакустическая диагностика зубчатых пар планетарных коробок передач	61
Савюк И.В., Рудь В.Д., Самчук Л.М., Повстная Ю.С. Использование окалины стали в качестве основного компонента экзотермической смеси	64
Жорник В.И., Дудан А.В., Гуца А.А. Свойства и области применения пластичных смазок на основе кальциевого и литиевого комплекса	67
Медведев О.А., Мелещук Д.В. Определение загрузки оборудования многономенклатурных автоматизированных производственных участков	69
Гаврилова В.В., Шупан П.И. Структура и механические свойства полимерных пленок, подверженных лазерному облучению	72
Кудрицкий Я.В., Ялковский Н.С. Особенности автоматизированного проектирования технологических процессов	75
Добряник Ю.А. Исследование и научное обоснование разрушения узла привода главного движения гибочного станка с ЧПУ	78
Гаврилова В.В., Казьмин А.А. Влияние криогенной обработки на структуру и эксплуатационные характеристики металлообрабатывающего инструмента	83

Горбунов В.П., Григорьев В.Ф., Дакало Ю.А. Оценка ресурса технологического оборудования с ЧП по параметрам точности траектории перемещения	86
Ляшук Н. У., Титовец Р.А. Совершенствование техники и технологии обработки субпродуктов	91
Омесь Д.В., Драган А.В. Механизмы формирования комбинационных частот в спектре вибросигнала зубчатой передачи	94
Возняковский А.А., Кольцова Т.С., Кидалов С.В., Овчинников Е.В. Получение композиционного материала алюминий-углеродное нановолокно с повышенными прочностными свойствами и регулируемой теплопроводностью	100
Драган А.В., Парфиевич А.Н., Саливончик Ю.Н. Использование искусственных нейронных сетей при акустической диагностике многозвальных зубчатых приводов	101
Чекан Н.М., Овчинников Е.В., Акула И.П., Эйсымонт Е.И., Шагойка Г.А. Термостойкие покрытия, формируемые на основе рефракторных металлов	105
Добрияник Ю.А. Влияние скорости при сварке трением и испытания на разрыв исследуемых образцов	108
Рыскулов А.А., Овчинников Е.В., Эйсымонт Е.И., Григорьева Т.Ф., Сластенов П.С. Определение зарядового состояния нанодисперсных диэлектрических частиц	112
Шмурадко В. Т., Пантелеенко Ф. И., Реут О. П., Руденская Н. А., Пантелеенко А. Ф. Материаловедческие принципы и технологические решения разработки, создания и применения износостойких корундовых материалов-изделий для механизмов подземной проходки грунтов и производства металлокорда	115
Семенченко М.В. Термоциклирование как способ интенсификации диффузионного насыщения проволоки в условиях электроконтактного нагрева	118
Копейко Д. С., Гаврилова Ж. И. Упрочнение режущего инструмента азотированием в тлеющем разряде ...	121
Евдокимов Д.В., Багрянцев Д.А. Разработка методики оценки теплонапряженности процесса обработки и величин остаточных напряжений при фрезеровании заготовок	124

Пантелеенко Ф.И., Данилов А.А., Специан М.В. Рациональные методы формообразования и упрочнения деталей профильных соединений	126
Богданович Д.И., Волчик А.А., Голуб В.М. Расчет торцового уплотнения с контактными кольцами из композиционного материала на основе карбида вольфрама	129
Ляшук Н. У., Титовец Р.А. Система машин для мясозирового производства. Классификация технологических линий убоя и разделки скота	133
Лежава А.Г., Трайгель А.С. Обзор неразрушающих методов контроля стыковых сварных соединений применительно к карданному валу	136

ИНЖЕНЕРИЯ ПОВЕРХНОСТИ. СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ РАСЧЕТА ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ И НАПРЯЖЕНИЙ

Пантелеенко Ф.И., Пантелеенко Е.Ф., Быстренков В.М., Петришин Г.В. Отделочная магнито-абразивная обработка тел вращения из труднообрабатываемых материалов	140
Константинов В.М., Дашкевич В.Г., Ковальчук А.В. Влияние параметров процесса борирования на хрупкость боридных слоев на сталях У8А и 9ХС	143
Дашкевич В.Г., Ковальчук А.В. Управление структурообразованием и фактор активации поверхности при химико-термической обработке в порошковых средах	146
Поболь И.Л., Поболь А.И., Леонович С.С. Современные электронно-лучевые технологии получения соединений и инженерии поверхности	149
Ширвель П.И., Чигарев А.В. О нелинейном деформировании твердых тел в условиях неравномерного нагрева и облучения	153
Константинов В.М., Ковальчук А.В. Повышение свойств термодиффузионных слоев осаждением твердых пленок TiAlN	155
Девойно О.Г., Кардаполова М.А., Яцкевич О.К. Влияние технологических параметров термодиффузионной обработки и содержания легирующих элементов на свойства оксида алюминия	158
Гайдук Ю.С., Ломоносов В.А., Савицкий А.А. Газочувствительные материалы на основе композиций оксида вольфрама (WO_3) и оксидов кобальта (CoO , Co_3O_4)	162

Лещик С.Д., Шупан П.И., Рыхлицкий Д.Г. Влияние наночастиц на процесс формирования и характеристики гальванических покрытий на основе цинка	165
Пантелеенко А.Ф. Изучение процесса плазменного напыления покрытий из диффузионно-легированного порошка ПР-Х18Н9	168
Федоров Д.Г., Пластинин А.А. Расчет температурных полей в заготовке при плоском шлифовании с учетом гидродинамики СОЖ	171
Гайдук Ю.С., Ломоносов В.А., Савицкий А.А. Ультразвуковой синтез оксида вольфрама (WO_3) и оксидов кобальта (Co_3O_4 , CoO , $CoOOH$)	173
Девойно О.Г., Жарский В.В., Кардаполова М.А., Пилипчук А.П. Использование сканирующей лазерной обработки для упрочнения чугуновых деталей	176
Менделеева О.Л. Износостойкие диффузионные слои со структурой Шарпи	180
Лещик С.Д., Шупан П.И., Сергиенко И.Г. Размерные характеристики частиц, полученных методом импульсной лазерной абляции металлов в жидкости	182
Девойно О.Г., Кардаполова М.А., Луцко Н.И., Лапковский А.С. Микротвердость и элементный состав наплавленных лазером валиков из сплава ПГ-12Н-01	185
Капленко В. С. Гомогенизация алюминиевых слитков, процессы, происходящие в металле, оптимальные режимы гомогенизации	188
Щербаков В.Г. Индукционная наплавка диффузионно-легированных сплавов из металлоотходов производства	192
В.М. Хвисевич, А.И. Веремейчик, В.В. Гарбачевский Осесимметричное термосиловое деформирование коротких цилиндрических тел при нейтронном облучении	194
Онысько С.Р., Хвисевич В.М., Чекан Н.М., Акула И.П. Напряженное состояние $ZrCN:DLC$ покрытия	198
Хвисевич В.М., Гарбачевский В.В., Веремейчик А.И. К решению плоских краевых задач термоупругости неоднородных осесимметричных тел методом потенциала	201
Батрак В.В., Веремейчик А.И., Сазонов М.И.,	

Хвисевич В.М., Черноиван Н.В.

Теоретические исследования температурных полей в приповерхностном слое с учетом экспериментальных данных 205

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ, ПРОИЗВОДСТВА И ЭКСПЛУАТАЦИИ АВТОМОБИЛЬНОГО ТРАНСПОРТА

Иванов В.П.

Синтез процессов и средств технологического оснащения ремонтного производства 210

Сафин А.И., Макарьянц Г.М., Прокофьев А.Б., Шахматов Е.В.

Модальный анализ автомобиля 213

Кусяк В.А., Ле Ван Нгуа, Гурин А.Н.

Электронная система управления поршковым электромагнитным тормозом на основе тиристорного привода 216

Акулич Я.А., Акулич А.П.

Исследование влияния нагрузочных факторов и способа обработки на эффективность приработки пар трения 220

Монтик С.В., Головченко Ю.А.

Оптимизация структуры зоны технического обслуживания автомобилей с использованием имитационного моделирования 223

Дронченко В.А., Семенов В.И.

Способ утилизации отработавших водных растворов технических моющих средств 227

Монтик С. В., Монтик Н. С., Головач А. П.

Корректировка методики оценки технико-экономических показателей технологического проектирования автотранспортных предприятий 230

Санюкевич Ф.М.

Механические приводы на базе волновых зубчатых передач 233

Концевич П.С., Волощук А.А.

Использование среды MS EXCEL при составлении оперативно-суточного плана текущего ремонта транспортных средств 236

Иванов В.П., Вигерина Т.В.

Анализ предремонтного состояния параметров восстанавливаемых коленчатых валов 239

Дашкевич В.Г.

Повышение жаростойкости меди диффузионным алитированием и силицированием 242

Научное издание

**НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И МАТЕРИАЛЫ,
АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА**

Материалы Международной научно-технической конференции

2-3 ноября 2016

Текст печатается в авторской редакции

Ответственный за выпуск О. Н. Прокопеня

Редактор

Корректор

Компьютерная верстка

Подписано к печати

Уч. изд. л.. Тираж 100 экз. Заказ № . Отпечатано на ризографе учреждения образования «Брестский государственный технический университет». 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.