

Вып. 1 (80)' 2023 **ПРОГРЕССИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ МАШИНОСТРОЕНИЯ**



ДОНЕЦКИЙ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ

ТЕХНИЧЕСКИЙ

УНИВЕРСИТЕТ

ISSN 2073-3216
(E) ISSN 2518-7120

ПРОГРЕССИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ МАШИНОСТРОЕНИЯ

**Международный
сборник научных трудов**

Выпуск 1 (80)' 2023



ДОНЕЦК - 2023

ISSN 2073-3216
(E) ISSN 2518-7120

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ ДНР
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

ПРОГРЕССИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ МАШИНОСТРОЕНИЯ

Международный сборник научных трудов

Основан в декабре 1994 года

Выходит 4 раза в год

Выпуск 1 (80)' 2023

Донецк – 2023

УДК 621.01(06)

Рекомендован к изданию Ученым Советом Донецкого национального технического университета (протокол № 2 от 31 марта 2023 г.)

В международном сборнике научных работ приведены некоторые вопросы теории и практики обработки изделий прогрессивными методами, показаны достижения и пути развития технологического оборудования, оснастки, металлорежущего инструмента и нанесения специальных покрытий на изделия машиностроения. Рассмотрены отдельные аспекты автоматизации производственных процессов и надежности технологического оборудования. Освещены современные проблемы материаловедения в машиностроении.

В данном сборнике публикуются ученые и ведущие специалисты из различных стран мира. Предназначен для научно-технических работников, ИТР и специалистов в области машиностроения.

Учредитель и издатель – ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ» (Свидетельство о государственной регистрации юридического лица от 07.04.2016 г. № 029192 серия АА03).

Издается при содействии **Международного союза машиностроителей**

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ: Михайлов А.Н. (гл. редактор), Гусев В.В. (зам. гл. редактора), Лахин А.М. (секретарь) (ДНР), Байков А.В. (ДНР), Бахадиров Г.А. (Узбекистан), Братан С.М. (Россия), Буленков Е.А. (ДНР), Бутенко В.И. (Россия), Витренко В.А. (ЛНР), Горобец И.А. (ДНР), Грубка Р.М. (ДНР), Данияров Н.А. (Казахстан), Еронько С.П. (ДНР), Ивченко Т.Г. (ДНР), Коваленко В.И. (ДНР), Мазуру С. (Молдова), Маляренко А.Д. (Беларусь), Мельникова Е.П. (ДНР), Навка И.П. (ДНР), Неделку Д. (Румыния), Поветкин В.В. (Казахстан), Прутяну О. (Румыния), Родованович М. (Сербия), Суслов А.Г. (Россия), Тока А. (Молдова), Федонин О.Н. (Россия), Хандожко А.В. (Россия), Чернышев Е. А. (ДНР), Шабаетов О.Е. (ДНР)

Адрес редакции: ДНР, 283001, г. Донецк, ул. Артема, 58,
ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ, кафедра «Технология машиностроения». Тел.: +7-856- 301-08-40. E-mail: tm@fimm.donntu.ru

Сайт: <http://ptsm.donntu.ru>

Сборник (Е) зарегистрирован в Министерстве информации Донецкой Народной Республики. Свидетельство о регистрации СМИ от 20 апреля 2017 г., серия ААА № 000125.

Сборник включен в перечень рецензируемых изданий ВАК ДНР (приказ №744 от 24.07.2017 г.), в котором могут публиковаться результаты диссертационных работ на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук, а также в базу данных РИНЦ (Российский индекс научного цитирования) (лицензионный договор № 177-04/2013 от 12.04. 2013 г.)

ISSN 2073-3216

ISSN 2518-7120 (E)

УДК 62-503.56

¹ А. И. Бохонский, д-р техн. наук, проф., ² Н. И. Варминская, канд. техн. наук,
³ М. М. Майстришин, канд. техн. наук

¹ ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет, г. Севастополь, Россия

² Черноморское высшее военно-морское училище имени П. С. Нахимова, г. Севастополь, Россия

³ ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет, г. Севастополь, Россия

E-mail: bohon.alex@mail.ru

ОПТИМАЛЬНОЕ ВРАЩЕНИЕ КОСМИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА С УЧЕТОМ КОЛЕБАНИЙ СОЛНЕЧНЫХ БАТАРЕЙ

Исследовано оптимальное переносно вращение космического корабля около продольной оси с учетом изгибных колебаний антенны (в относительном движении). Предложен алгоритм практически эквивалентной замены управления в виде полинома кососимметричным синусоидальными управлениями, которые обеспечивают достижение состояния абсолютного покоя при заданном времени и угле вращения.

Ключевые слова: переносное оптимально вращение, разгон-торможение, относительно движение, достижение абсолютного покоя.

A. I. Bokhonsky, N. I. Varminskaya, M. Maystrishin

OPTIMAL ROTATION OF A SPACE OBJECT TAKING INTO ACCOUNT THE OSCILLATIONS OF SOLAR PATTERNS

The optimal portable rotation of the spacecraft about the longitudinal axis is studied, taking into account the bending oscillations of the antenna (in relative motion). An algorithm is proposed for almost equivalent replacement of control in the form of polynomials by skew-symmetric sinusoidal controls, which ensure the achievement of a state of absolute rest at a given time and angle of rotation.

Keywords: optimally portable rotation, acceleration-deceleration, relatively movement, achievement of absolute rest.

1. Введение

Оптимальное управление колебаниям упругих систем представлено в литературе [1, 2], результаты исследования оптимальных управлений поступательного и вращательного движения упругих объектов приведены в публикациях [3-7]. Предложенные управления перемещением устройств конечной жесткости применимы не только в автоматизированном производстве, но и в управлении перемещением космических объектов.

Реверсионное конструирование известного управления «разгон – торможение» при поступательном движении.

Достаточно убедительно обосновывается экономия энергии на простом примере поступательного движения объекта. В этом случае оказывается естественным нахождение ускорения (управления) без использования известного критерия оптимальности

$$\int_0^T U_1^2 dt.$$

Пусть поведение объекта описывается полиномом с его производными

$$S_1(t) = \sum_{i=1}^4 C_i t^{i-1}, \quad V_1(t) = \frac{dS_1(t)}{dt}, \quad U_1(t) = \frac{dV_1(t)}{dt}. \quad (1)$$

Тогда, с учетом только краевых условий

$$S_1(0) = 0, V_1(0) = 0, S_1(T) = L, V_1(T) = 0 \quad (2)$$

непосредственно следуют известные из литературы зависимости:

$$U_1(t) = \frac{6L}{T^3}(T - 2t), V_1(t) = \frac{6Lt}{T^3}(T - t), S_1(t) = \frac{Lt^2}{T^3}(3T - 2t) \quad (3)$$

Энергия, затраченная на реализацию данного оптимально управляемого движения

$$A_1 = \int_0^{t/2} U_1 V_1 dt = 2,25 \frac{L^2}{T^2}, \quad (4)$$

которая меньше энергии при синусоидальном кососимметричном управлении.

Конструирование нового типа управления.

Принимаем оптимальное перемещение в виде полинома, удовлетворяющего начальным условиям $S_2(0) = 0, V_2(0) = 0$:

$$S_2(t) = \sum_{i=1}^4 C_i t^{i+1}, V_2(t) = \frac{dS_2(t)}{dt}, U_2(t) = \frac{dV_2(t)}{dt}. \quad (5)$$

Для определения постоянных приняты краевые условия:

$$V_2(0) + V_2(T) = 0; S_2(T) = L; \frac{dU_2}{dt}(T/2) = 0; \frac{d^2U_2}{dt^2}(T/2) = 0. \quad (6)$$

Аналогичный результат дает условие равенства производной от интеграла действия (по константе C_3). $\frac{\partial J}{\partial C_3} = \frac{1}{2} \int_0^T (U_1 - U_2)^2 dt = 0$.

После определения константы и факторизации полиномов, выражения для ускорения, скорости, перемещения принимают вид:

$$U_2 = \frac{10L(T - 2t)^3}{T^5}, \quad (7)$$

$$V_2 = \frac{10Lt(T - t)}{T^5}(2t^2 - 2Tt + T^2), S_2 = \frac{Lt^2}{T^5}(5T^3 - 10T^2t + 10Tt^2 - 4t^3)$$

Для данного управления затрачиваемая энергия равна

$$A_2 = 2 \int_0^T U_2 V_2 dt = \frac{1,5625L^2}{T^2}. \quad (8)$$

Для нового типа управления на среднем участке движение близко к равномерному с уменьшением кинетической энергии. В результате обобщения известной задачи Лагранжа выявлено существование предельной энергоемкости управления, при заданном время T и перемещении на расстояние L) цель движения – перемещение объекта в новое состояние покоя.

Минимально энергоемкое управление типа «разгон-торможение» применимо в различных областях современной техники, как в земных условиях, так и в состоянии невесомости.

При вращательном движении наблюдается некоторая аналогия в алгоритме конструирования оптимального управления.

В случае экономии энергии (более чем на 30 %) по сравнению с кососимметричным случаем управления вращательным движением [3-5] выражения для угла поворота, угловой скорости и углового ускорения (управления) имеют вид:

$$\begin{aligned} \varphi(t) &= \frac{\varphi_* t^2}{T^5} (5T^3 - 10T^2 t + 10T t^2 - 4t^3), \\ \omega(t) &= \frac{d\varphi}{dt} = \frac{10\varphi_* t}{T^5} (T^3 - 3T^2 t + 4T t^2 - 2t^3), \\ \varepsilon(t) &= \frac{d\omega}{dt} = \frac{10\varphi_*}{T^5} (T^3 - 6T^2 t + 12T t^2 - 8t^3). \end{aligned} \tag{9}$$

где φ_* – максимальный угол поворота; T – общее время вращения.

2. Основное содержание и результаты работы

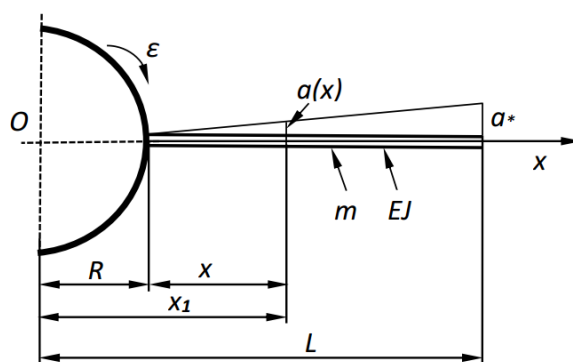


Рисунок 1. Космический корабль с антенной конечной изгибной жесткости (корпус и антенна)

С учетом практической реализации (рис. 1) управление $\varepsilon(t)$ возможна замена углового ускорения эквивалентным (либо близким к эквивалентному) управлением:

$$\varepsilon_1(t) = a_1 \sin pt \tag{10}$$

где a_1 – амплитудное значение ускорения (c^2), $p = 2\pi / T$, T – время вращения объекта при эквивалентном управлении типа «разгон-торможение».

Из (10) следует зависимость для угловой скорости и угла поворота:

$$\omega_1(t) = \frac{a_1}{p} (1 - \cos pt), \quad \varphi_1(t) = \frac{a_1}{p} \left(t - \frac{\sin pt}{p} \right) \tag{11}$$

При неизменности моментов инерции использованы два условия эквивалентности преобразований: равенства импульсов ускорений и энергий, затрачиваемых на реализацию оптимального вращательного движения

$$R - R_1 = 0, \tag{12}$$

$$\text{где } R = 2 \int_0^{T/2} \varepsilon(t) dt = \frac{5\varphi_*}{2T}, \quad R_1 = 2 \int_0^{T/2} \varepsilon_1(t) dt = \frac{2a_1 T_1}{\pi}, \tag{13}$$

$$A - A_1 = 0, \tag{14}$$

$$A = 2 \int_0^{T/2} \varepsilon \omega dt = \frac{1,5625}{T} \varphi_*^2, \quad A_1 = 2 \int_0^{T/2} \varepsilon_1 \omega_1 dt = \frac{a_1^2 T_1^2}{\pi^2}. \quad (7)$$

В относительном движении изгибные колебания антенны, как консольного стержня с одним защемлением концов в корпусе грузовика, без учета сопротивления описываются дифференциальным уравнением:

$$EJ \frac{\partial^4 W_r(x,t)}{\partial x^4} + \frac{\partial^2 W_r(x,t)}{\partial t^2} = -f(x,t) \quad (15)$$

где EJ – жесткость при изгибе (J – модуль упругости; J – осевой момент инерции поперечного сечения бруса); $W_r(x,t)$ – относительное перемещение сечения с координатой x бруса в связи с его колебаниями; m – масса единицы длины; $f(x,t)$ – распределенная динамическая нагрузка, обусловленная оптимальным переносным вращательным движением («разгон-торможение») консоли конечно изгибной жесткости.

Согласно алгоритму преобразований, приведенному в работах [3–5], $f(x,t)$ с учетом распределенной массы записывается следующим образом:

$$f(x,t) = (A + B_x) \sin pt, \quad (16)$$

где $A = \frac{m\varphi_* p^2 R}{2\pi L}$, $B = \frac{m\varphi_* p^2}{2\pi L}$.

Дифференциальное уравнение для первой моды колебаний:

$$\frac{d^4 W_1(x)}{dx^4} - k^4 W_1(x) = \frac{A}{EJ} + \frac{B}{EJ} x \quad (17)$$

С учетом только первой моды колебаний (10) решение однородного уравнения с использованием метода Фурье принято в виде:

$$W_1(x,t) - W_1(x) \sin pt \quad (18)$$

Частное решение неоднородного уравнения имеет вид:

$$W_1^*(x) = \frac{D_1}{k^4} + \frac{D_2}{k^4} x, \quad (19)$$

где $k^4 = \frac{mp^2}{EJ}$, $D_1 = \frac{A}{EJ}$, $D_2 = \frac{B}{EJ}$.

Общее решение (17):

$$W_1(x) = C_1 \sin(kt) + C_2 \cos(kx) + C_3 \sinh(kx) + C_4 \cosh(kx) - \frac{A}{k^4 EJ} - \frac{B}{k^4 EJ}. \quad (20)$$

Произвольные постоянные для антенны найдены из условий:

$$W_1(0) = 0, \quad W_1'(0) = 0, \quad W_1''(L) = 0, \quad W_1'''(0) = 0, \quad W_1^{IV}(L) = 0 \quad (21)$$

Один из примеров, описывающий колебания антенны изображен на рис. 2. В фиксированный момент времени $t = T$ при повороте объекта на угол φ_1 достигается абсолютный покой. Графики переносного движения изображены на рис. 3.

3. Заключение.

При оптимальном вращении грузовика возможно не только достижение абсолютного покоя объекта, но и некоторая экономия энергии для реализации вращательного движения.

В случае оптимального вращения при использовании кососимметричных управлений (угловых ускорений) вращательный момент, создаваемый парой сил, подчиняется условию $M = J\varepsilon_1(t)$, где J – общий физический момент инерции относительно продольно оси грузовика.

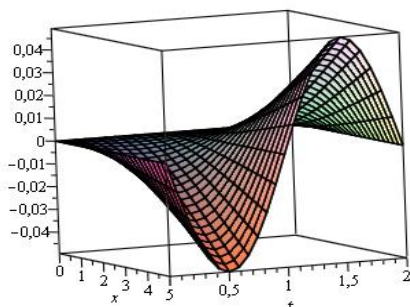


Рисунок 2. Относительное движение антенны.

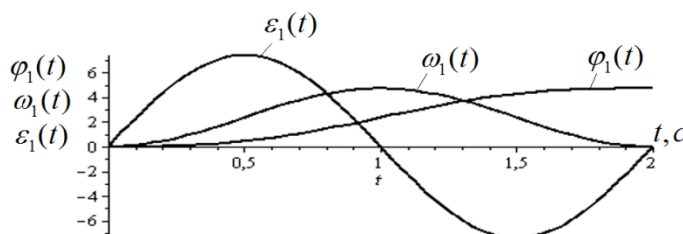


Рисунок 3. Переносное вращательное движение грузовика (вокруг продольной оси).

ЛИТЕРАТУРА:

1. Черноусько, Ф. Л. Управление колебаниями / Ф. Л. Черноусько, Л. Д. Акуленко, Б. Н. Соколов. – М. "Наука", 1980. – 384 с.
2. Олейников, В. А. Основы оптимального и экстремального управления / В. А. Олейников, Н. С. Зотов, А. М. Пришвин. – М.: Изд-во "Высшая школа", 1969. – 296 с.
3. Бохонский, А. И. Оптимальное управление переносным движением деформируемых объектов: теория и технические приложения / А. И. Бохонский, Н. И. Варминская, М. И. Мозолевский. – Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2007. – 296 с.
4. Бохонский, А. И. Реверсионный принцип оптимальности / А. И. Бохонский – М.: Вузовский учебник: ИНФРА-М, 2016. – 174 с.
5. Бохонский, А. И. Управление вращением космического корабля с учетом элементов конечной жесткости / А. И. Бохонский, Н. И. Варминская // Journal of Advanced Research in Technical Science. USA: SRC MS, AmazonKDP– 2022. – p. 28-31.
6. Бохонский, А. И. Оценка энергопотребления для оптимального управления движением объекта (Evaluation of energy consumption for the object motion optimal control / А. И. Бохонский, Н. И. Варминская // ICMТMTE IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – <https://doi.org/10.1088/1757-899X/709/4/044093>.
7. Бохонский, А. И. Оптимальное вращение объектов конечной жёсткости. / А. И. Бохонский, М. М. Майстришин, А. И. Рыжков // Автоматизация и измерения в машино- приборостроении: научный журнал. – Севастополь: Изд-во СевГУ, 2021. – Вып. №3(15). – С. 3-11.

Поступила в редколлегию 07.02.2023 г.

УДК 622.232.72

И. А. Горобец, канд. техн. наук, доцент
ГОУВПО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ», ДНР
E-mail: gorobets.ascon@gmail.com

ИССЛЕДОВАНИЕ ПИКОВЫХ НАГРУЗОК ПРИВОДА ГОРНЫХ МАШИН

Описана необходимость учёта пиковых механических нагрузок в электромеханической структуре трансмиссии горного комбайна. Определены параметры механической характеристики приводных электродвигателей горных машин. Приведены условия проведения экспериментальных исследований для подтверждения результатов теоретических изысканий. Дан анализ результатов проведенных экспериментальных исследований. Даны рекомендации по использованию значений пиковых нагрузок в приводах горных машин.

Ключевые слова: нагрузка, привод, двигатель, момент, комбайн

I. Gorobets

INVESTIGATION OF PEAK LOADS OF MINING MACHIN TRANSMISSION

The necessity of taking into account peak mechanical loads in the electromechanical structure of the transmission of a mining machines is described. The parameters of the mechanical characteristics of the drive electric motors of mining machines are determined. The conditions for conducting experimental investigation to confirm the results of theoretical research are given. The analysis of the results of the conducted experimental investigation is given. Recommendations on the use of peak load values in the transmission of mining machines are given.

Keywords: load, transmission, motor, torque, shearer

1. Введение

Дальнейшее совершенствование конструкции горных машин связано с эффективным использованием эксплуатационной части жизненного цикла как самого изделия, так и его сборочных единиц. Для этого на стадии проектирования изделий горного машиностроения необходимо учитывать все возможные типы нагрузок, воздействующие на объект эксплуатации. Одной из важных составляющих нагруженности элементов изделия является учёт характера изменений и величины пиковых нагрузок, существенно снижающих потенциал долговечности объекта в рамках эксплуатационной части его жизненного цикла. Такие пиковые нагрузки, возникающие на исполнительном органе горной машины в процессе ее эксплуатации, существенно зависят от механических характеристик и потенциала, как привода изделия, так и его трансмиссии.

В качестве привода горных машин, как правило, используются электрические двигатели [1, 2, 3], в связи с этим для определения влияния пиковых нагрузок на проектируемый объект уместно рассматривать зависимость параметров максимальных нагрузок на исполнительном органе от параметров электромеханической системы проектируемого изделия. К электромеханическим параметрам горной машины, влияющим на эффективность расчётной эксплуатационной величины жизненного цикла, можно отнести как параметры электромеханического привода самого объекта, включающие коэффициент жёсткости трансмиссии, маховый момент ротора электрического двигателя и параметры его механической характеристики, так и параметры внешней среды, с которой взаимодействует исполнительный орган горного комбайна. К параметрам внешней среды относятся: твёрдость, пластичность, сыпучие характеристики, упругонапряжённые характеристики выгружаемого исполнительным органом угля, а также изменения напряжения питающей двигатель электрической сети и т. д.

Одной из конструктивных особенностей горных машин, является ограничение габаритов корпусной части объекта [1, 2, 3]. Наибольшую актуальность такие ограни-

чения имеют при проектировании горных комбайнов для выемки тонких пологих пластов, рис. 1, где габариты по высоте, как правило, не превышают 400-450мм, а мощность используемого электрического двигателя превышает 160 кВт. В некоторых конструкциях горных машин используются несколько приводных двигателей, например, как в машинах К-103 и УКД-300 (используется 2 двигателя). Работа двигателей многодвигательного привода осуществляется по двум различным схемам – на суммирующий и на индивидуальный вал. Таким образом, привод исполнительного органа очистных комбайнов представляет собой сложную электромеханическую систему, параметры которой предопределяются механической и электрической частями.

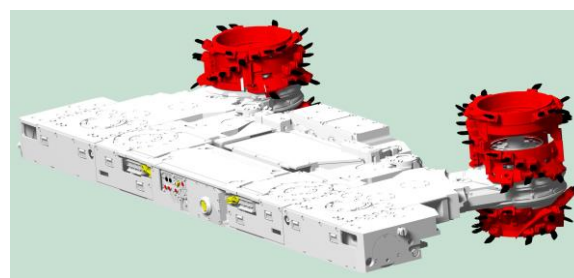


Рисунок 1. Вид очистных комбайнов со шнековым и барабанным исполнительными органами.

В связи с перечисленными конструктивными и эксплуатационными особенностями горных комбайнов, актуальным является вопрос определения величины пиковых нагрузок на электромеханический привод проектируемого изделия.

Целью исследований является определение пиковых значений внешней механической нагрузки горного комбайна для возможности учёта нагруженности электромеханического привода изделия на стадии ее проектирования.

2. Основное содержание и результаты

Выполнение поставленной цели исследований основывается на проведении теоретических и специальных экспериментальных исследований по определению величины пиковых механических нагрузок, воздействующих на электромеханическую систему горного комбайна.

Для проведения теоретических исследований были использованы методики, изложенные в [4, 5]. При моделировании рабочего процесса и дальнейшего теоретического исследования величины пиковой механической нагрузки на электромеханическую систему горного комбайна плавно изменяющаяся механическая характеристика электрического двигателя была линеаризована и представлена кусочно-ломанными отрезками прямой.

В качестве объекта исследований использовался очистной комбайн для выемки тонких пологих пластов модели КА-80. В настоящее время, в качестве электрических двигателей привода исполнительного органа используются асинхронные, короткозамкнутые двигатели с двухбелочей клеткой номинальным напряжением 660 или 1140 В. Рассмотрим возможные случаи конструктивного исполнения очистного комбайна с электродвигателями типов: ЭКВ 3,5-125У5 и ЭКВ-160У5. Для определения механической нагруженности электромеханического привода горного комбайна восполь-

зуюемся механическими характеристиками приводных электродвигателей. Кривые механических характеристик электрических двигателей линеаризуем при помощи методик [4, 5], см. рис.2. Для проведения теоретических расчётов воспользуемся исходными данными - номинальными значениями крутящих моментов электрических двигателей: $M_{H}^I=830$ Нм, для электродвигателя модели ЭКВ-3,5-125У5 и $M_{H}^{II}=970$ Нм для электродвигателя модели ЭКВ-3,5-160У5, соответственно.

При проведении теоретических исследований в качестве исходных данных так же использовались: передаточное число трансмиссии очистного комбайна $U_{TP}=26,55$; диаметр исполнительного органа по вершинам резцов $D_{uo}=1,0$ м; приведенный коэффициент жёсткости трансмиссии $K_c=3600$ Нм/рад; приведенный коэффициент жёсткости внешнего сопротивления – разрушаемого угольного массива.

Для определения приведенного коэффициента жёсткости трансмиссии очистного комбайна КА-80 с участием автора проводились стендовые экспериментальные исследования в условиях предприятия-изготовителя ОАО «Донецкий завод «Эксперимент». Методикой проведения экспериментальных исследований по определению приведенного коэффициента жёсткости трансмиссии очистного комбайна предполагались измерения угла закручивания вала электродвигателя в зависимости от величины приложенного крутящего момента при застопоренном исполнительном органе горного комбайна [6].

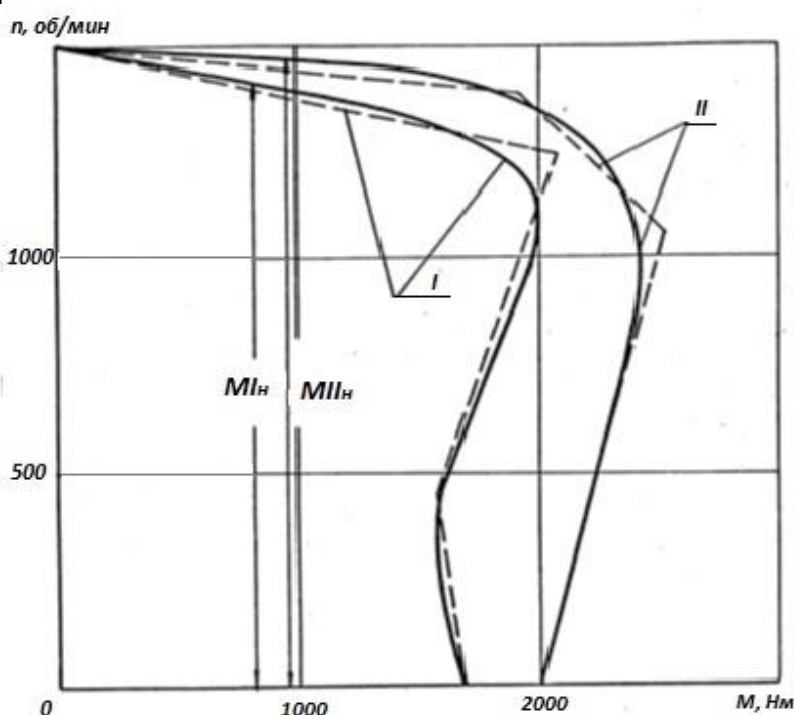


Рисунок 2. Графики механических характеристик (сплошная линия) электродвигателей ЭКВ 3,5-125У5(1) и ЭКВ 3,5 – 160У5(2) и их кусочная линеаризация (пунктирная линия)

Для определения значения коэффициента жёсткости внешнего сопротивления, приведенного к валу двигателя [7], необходимо задаться коэффициентом жёсткости внешнего сопротивления на исполнительном органе. В результате специально проведенных экспериментальных исследований в условиях выемки очистными комбайнами угольных пластов сложного строения, установлена величина коэффициента жёсткости внешней среды, равная $K_y^{uo} = (7,7 - 20) \cdot 10^5$ Н/м.

Определим граничные значения приведенных к валу электродвигателя коэффициентов жёсткости внешней среды K_y . Для этого используем в качестве исходных данных величины передаточного числа трансмиссии горного комбайна U_{mp} и диаметр его исполнительного органа D_{uo} .

$$K_y = 0,25K_y^{uo} D_{uo}^2 U_{mp}^2$$

Приведенный к валу электродвигателя коэффициент жёсткости системы определим по зависимости [6]

$$K = K_c / (K_c / K_y + 1)$$

Таким образом, приведенный к валу электродвигателя коэффициент жёсткости системы находится в пределах $K = 254 \dots 593$ Нм/рад.

Величину крутящих моментов в трансмиссии очистного комбайна произведём для верхних границ линеаризованных участков механической характеристики электродвигателя, рис. 2.

Для первого участка отрезка линеаризованной механической характеристики электродвигателя значение момента сил сопротивления определяется из выражения [4,5]

$$M_C^I = M_H^I + \frac{0,105Kn_c(1-S_H^I) \left[\gamma_2^2 (e^{\gamma_1 t_1^I} - 1) - \gamma_1^2 (e^{\gamma_2 t_1^I} - 1) \right]}{\gamma_1 \gamma_2 (\gamma_2 - \gamma_1)}$$

где $n_c=1500$ об/мин – синхронная частота вращения ротора электродвигателя; S_H – номинальное скольжение, γ_1, γ_2 – корни характеристического уравнения; t_1^I – время опрокидывания ротора электродвигателя от начала момента роста нагрузки на I участке.

Корни характеристического уравнения γ_1 и γ_2 определяются из выражения [4,5]

$$\gamma = \frac{-\frac{M_H^I}{S_H^I} \pm \sqrt{\left(\frac{M_H^I}{S_H^I}\right)^2 - 4 * 0,105n_c^2 \frac{GD^2}{375} K}}{2n_c \frac{GD^2}{375}}$$

значение времени t_1^I определяется из выражения [4,5]

$$t_1^I = \frac{1}{\gamma_1} \ln \frac{\gamma_2 - \gamma_1}{\gamma_2 (S_H^I - 1)} \left(\frac{M_{max}^I}{M_H^I} S_H^I - 1 \right)$$

где GD^2 – маховый момент ротора двигателя; S_H – номинальное скольжение; M_{max}^I, M_H^I – максимальный и номинальный моменты на 1 участке, соответственно.

Для второго участка. Значение момента сил сопротивления в конце участка 2 определяется из выражения [4, 5]

$$M_{C2}^I = M_{C1}^I - n_{onp}^I \cdot 0,105K / (\omega_1^2 + \alpha_1^2) x$$

$$x \left\{ \frac{e^{\alpha_1 t_2^I} \left[(A\alpha_1 + \alpha_1^2 - \omega_1^2) \sin \omega_1 t_2^I - (2\alpha_1 + A)\omega_1 \cos \omega_1 t_2^I \right] + 2\alpha_1 + A}{\omega_1} \right\},$$

где $n_{onp}^I = 1190$ об/мин – частота вращения ротора электродвигателя, соответствующая границе участков 1 и 2; K - коэффициент жёсткости системы, t_2^I – время опрокидывания двигателя на участке 2;

$$A = -375(M_{max}^I - M_{C1}^I) / (n_{onp}^I GD^2);$$

$$\alpha = 375 / (2n_{onp}^I GD^2);$$

$$m_1 = n_{onp}^I (M_{onp}^I - M_{23}^I) / (n_{onp}^I - n_{23}^I),$$

где M_{23}^I и n_{23}^I – соответственно момент, развиваемый двигателем, и частота вращения его ротора на границе участков 2 и 3, n_{onp}^I – частота вращения ротора электродвигателя, соответствующая границе участков 1 и 2.

$$\omega_1 = \frac{\sqrt{4 \cdot 0,105 \cdot K (n_{onp}^I)^2 \frac{GD^2}{375} - m_1^2}}{2n_{onp}^I \frac{GD^2}{375}}$$

Значение времени опрокидывания на участке 2 определяется из уравнения

$$\left(\frac{\omega_1 + \alpha_1^2}{2} + \alpha_1 A \right) (t_2^I)^2 + A t_2^I - \frac{M_{onp}^I - M_{23}^I}{m_1} = 0.$$

Для третьего участка отрезка линеаризованной механической характеристики значение максимального момента в трансмиссии определяется из выражения [4, 5]

$$M_{Cmax}^I = M_{C2}^I + n_{23}^I \cdot 0,105K \cdot l / (\alpha_2^2 + \omega_2^2) x$$

$$x \left\{ \frac{e^{\alpha_2 t_3^I} \left[\omega_2 (2\alpha_2 + B) \cos \omega_2 t_3^I - (B\alpha_2 + \alpha_2^2 - \omega_2^2) \sin \omega_2 t_3^I \right] + 2\alpha_2 - B}{\omega_2} \right\},$$

где

$$\alpha_2 = - \frac{m_2}{2n_{23}^I \frac{GD^2}{375}};$$

$$m_2 = M_{пуск}^I - M_{23}^I.$$

Здесь $M_{пуск}^I = 1670$ Нм – значение пускового момента электродвигателя

$$\omega_2 = \frac{\sqrt{4 \cdot 0,105 \cdot K (n_{23}^I)^2 \frac{GD^2}{375} - m_2^2}}{2n_{23}^I \frac{GD^2}{375}};$$

$$B = 375(M_{23}^I - M_{C23}^I)/(n_{23}^I GD^2) .$$

Значение времени t_3^I определяется из выражения [4]

$$t_3^I = \frac{1}{\omega_2} \arctg[\omega_2 / (\alpha_2 + B)]$$

Общее время опрокидывания электродвигателя определится суммой времён:

$$t_{опр}^I = \sum t_i^I = t_1^I + t_2^I + t_3^I$$

По указанной методике определяются также параметры механической характеристики электродвигателя ЭКВ 3,5-160У5, рис. 2.

При проведении расчётов использовались следующие данные механических параметров электродвигателя ЭКВ 3,5-125У5: $M_{max}^I = 1900$ Нм; $S_H^I = 0,05$; $GD^2 = 47$ Нм; электродвигателя ЭКВ 3,5-160У5: $M_{max}^{II} = 2410$ Нм; $S_H^{II} = 0,05$; $GD^2 = 47$ Нм.

Результаты расчётов пиковых параметров механических характеристик электродвигателей сведены в табл. 1.

Таблица.1. Результаты расчёта максимальных нагрузок привода комбайна КА-80

| Параметр | Двигатель ЭКВ 3,5-125У5 | | Двигатель ЭКВ 3,5-160У5 | |
|---------------|-------------------------|----------------|-------------------------|----------------|
| | $K=254$ Нм/рад | $K=593$ Нм/рад | $K=254$ Нм/рад | $K=593$ Нм/рад |
| M_{C1} , Нм | 2360 | 2860 | 2320 | 2780 |
| M_{C2} , Нм | 3860 | 5050 | 3610 | 4560 |
| M_{C3} , Нм | 4000 | 5230 | 4790 | 5920 |
| $t_{опр}$, с | 0,129 | 0,0775 | 0,135 | 0,075 |

Для подтверждения теоретических исследований определения пиковых параметров механических характеристик электромеханических структур горных комбайнов были проведены (с участием автора) шахтные экспериментальные исследования на базе угольного пласта С₅ шахты «Терновская» ПО «Павлоградуголь». Угольный пласт С₅ характеризуется сложным строением, а средняя сопротивляемость угля резанию находилась в пределах 2000...2500 Н/м. В качестве объекта исследований использовался очистной комбайн КА-80, оснащённый электродвигателем ЭКВ 3,5-125У5.

В результате проведенных экспериментальных исследований установлена величина среднего времени опрокидывания электродвигателя, равная 0,12 с. При этом, мощность (следовательно, и крутящий момент) опрокидывания электродвигателя очистного комбайна превысила номинальную в 2 раза, рис. 3.

3. Заключение

Исследованы значения пиковых нагрузок электромеханической системы привода горных комбайнов на основе линеаризации кривой механической характеристики применяемых в трансмиссии изделий асинхронных электродвигателей. Определены теоретические значения времени опрокидывания и максимальных крутящих моментов электроприводов очистных комбайнов. Для подтверждения теоретических изысканий проведены специальные шахтные экспериментальные исследования, результаты которых подтвердили основные параметры теоретических расчётов пиковых нагрузок электромеханических систем привода горных комбайнов.

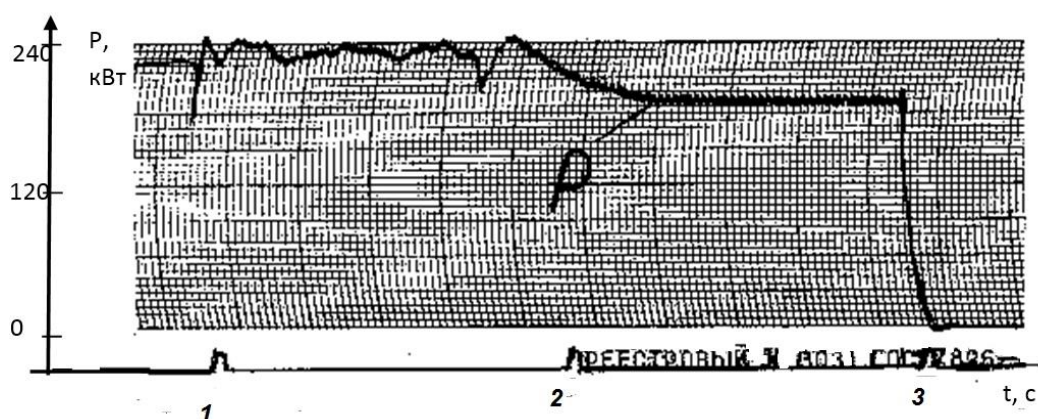


Рисунок 3. Фрагмент диаграммы мгновенной мощности электродвигателя ЭКВ 3,5 -125У5 очистного комбайна КА-80

Разработанная математическая модель определения пиковых нагрузок электро-механической системы может использоваться на стадии проектирования конструкций трансмиссий и привода горных машин, позволит выполнить теоретические исследования эффективности эксплуатационной части жизненного цикла изделия, а также выявить новые направления улучшения параметров электромеханического привода горных комбайнов.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Казаченко, Г. В. Горные машины. В 2 частях. Ч. 2. Машины и комплексы для добычи полезных ископаемых: учебное пособие / Г. В. Казаченко, В. Я. Прушак, Г. А. Басалай; под редакцией В. Я. Прушака. – Минск: Вышэйшая школа, 2018. – 232 с.
2. Гилёв, А. В. Горные машины и оборудование подземных разработок: учебное пособие к практическим занятиям / А. В. Гилёв, В. Т. Чесноков, В. А. Карепов, Е. Г. Малиновский. – Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2014. – 128 с.
3. Ефременков, А. Б. Горные машины и оборудование. Введение в специальность. Часть 1: учебное пособие / А. Б. Ефременков, А. А. Казанцев, М. Ю. Блащук. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009 – 152 с.
4. Альшиц, Я. И. Горные машины / Я. И. Альшиц, Б. А. Верклов, А. Н. Вороницкий и др. – М.: Госгортехиздат, 1961. – 492с.
5. Малеев, Г. В. Проектирование и конструирование горных машин и комплексов / Г. В. Малеев, В. Г. Гуляев, Н. Г. Бойко и др. – М.: Недра, 1988. – 368с.
6. Бойко, Н. Г. Динамические характеристики системы привода исполнительного привода очистного комбайна КА-80 / Н. Г. Бойко, А. В. Болтян, Н. Г. Нечпаев, В. Г. Шевцов, И. А. Горобец // Разработка месторождений полезных ископаемых: Респ. межвед. науч.-техн. сб. – Киев: Техника, 1985. – Вып. № 70. – С. 35-42.
7. Тагиева, Р. Ф. Обработка экспериментальных данных. В 2 частях. Ч.2: учебное пособие / Р. Ф. Тагиева, А. Н. Титов. – Казань: Казанский национальный исследовательский технологический университет, 2018. – 136 с.

Поступила в редколлегию 02.02.2023 г.

УДК 621.9.042

Р. М. Грубка, д-р техн. наук, проф.

Донецкий национальный технический университет, ДНР

Тел. / Факс: +7 (949) 3114221; E-mail: grubka_roman@mail.ru

ТРАЕКТОРИЯ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ СПЕЦИАЛЬНО СПРОФИЛИРОВАННОГО ИНСТРУМЕНТА ПРИ МНОГОКООРДИНАТНОЙ ОБРАБОТКЕ ЗУБЬЕВ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ КОЛЕС МЕТОДОМ КОПИРОВАНИЯ

В статье представлены основные зависимости для определения параметров пространственной траектории перемещения специально спрофилированного режущего инструмента, работающего по методу копирования, при обработке зубчатых венцов с пространственно-модифицированными зубьями. Приведенные в работе зависимости позволяют определить координаты узловых точек траектории перемещения режущего инструмента в процессе многокоординатной обработки пространственно-модифицированных зубьев цилиндрических колес на станках с ЧПУ. Для специально спрофилированного инструмента получены зависимости по определению геометрии его режущей кромки в зависимости от геометрии боковой поверхности зубьев. Использование результатов работы в рамках пространственного подхода к решению вопросов формообразования зубчатых венцов с пространственно-модифицированными зубьями на зубофрезерных операциях позволяет теоретически исследовать процессы нарезания зубчатых венцов с целью повышения геометрической точности зубьев, назначения наиболее рациональных режимных параметров обработки для непрерывно изменяющихся условий резания или определения резервов в повышении производительности процесса нарезания модифицированных зубчатых венцов цилиндрических колес.

Ключевые слова: модификация зубьев, метод копирования, траектория перемещения, режущий инструмент, профилирующая плоскость

R. M. Grubka

THE TRAJECTORY OF MOVEMENT OF A SPECIALLY PROFILED TOOL DURING MULTI-COORDINATE MACHINING TEETH OF CYLINDRICAL WHEELS BY COPYING METHOD

The article presents the main dependencies for determining the parameters of the spatial trajectory of movement of a specially profiled cutting tool, working by the copying technique, when processing gear rims with spatially modified teeth.. The dependences given in the work allow us to determine the coordinates of the nodal points of the trajectory of the cutting tool in the process of multi-coordinate processing of spatially modified teeth of cylindrical wheels on CNC machines. For a specially profiled tool, dependences are obtained for determining the geometry of its cutting edge depending on the geometry of the lateral surface of the teeth. The use of the results of the work within the framework of a spatial approach to solving the problems of shaping gear rims with spatially modified teeth in gear hobbing operations allows theoretically investigating the processes of cutting gear rims in order to increase the geometric accuracy of the teeth, the appointment of the most rational processing parameters for continuously changing cutting conditions or determination of reserves in increasing the productivity of the process of cutting modified gear rims of cylindrical wheels.

Keywords: modification of teeth, copying method, displacement path, cutting tool, profiling plane

1. Введение

Зубчатые колеса являются одними из самых сложных и трудоемких в изготовлении деталей машин, а вопросам повышения производительности и точности изготовления зубчатых венцов уделяется повышенное внимание. Широкое применение зубчатых передач обусловлено рядом их достоинств, в том числе высокой нагрузочной способностью и долговечностью. Для повышения нагрузочной способности и долговечности цилиндрических зубчатых передач зубья одного из звеньев подвергают модификации [1, 2], что достигается путем реализации пространственного зацепления между зубьями при обеспечении линейного характера их контактирования [3, 4]. При этом профили

зубьев модифицированного колеса в различных сечениях по их длине отличаются от эвольвентного профиля и друг от друга.

Технологические способы формообразования цилиндрических колес с наружными зубьями с модифицированной боковой поверхностью представлены в работе [5]. Применение универсального зуборезного оборудования и зуборезных станков с ЧПУ, наряду с использованием стандартного и специально спрофилированного режущего инструмента позволяет получать зубчатые венцы с геометрией боковой поверхности зубьев приближенной к заданной пространственной [6, 7]. В процессе формообразования зубьев методом копирования профиль режущей кромки инструмента воспроизводится в профилирующей плоскости режущего инструмента, а степень приближения геометрии реально нарезаемой боковой поверхности зубьев к теоретически рассчитанной будет зависеть от геометрии режущей кромки инструмента и от вида траектории его перемещения [8].

Обеспечение наиболее близкого приближения геометрических параметров боковой поверхности нарезаемых зубьев к теоретически рассчитанным достигается при постановке и решении пространственных технологических задач формообразования зубчатых венцов с пространственной модификацией зубьев методом копирования.

Основным сдерживающим фактором для широкого применения пространственных зацеплений цилиндрических колес является отсутствие обобщенных расчетных методик для определения элементов технологического обеспечения изготовления зубчатых венцов с пространственно-модифицированными зубьями, зацепления на основе которых способны компенсировать все погрешности изготовления и монтажа, а также перемещения, вызванные деформациями в процессе эксплуатации в результате действия рабочей нагрузки [3, 4]. Задача разработки технологического обеспечения многокоординатной обработки зубчатых венцов с пространственно-модифицированными зубьями может быть решена путем определения взаимосвязи между функциональными свойствами зубчатых колес и зубчатых передач на их основе, характеристиками передач и технологическими воздействиями, которые необходимо осуществить для достижения искомых функциональных свойств и характеристик [9]. Поэтому повышение эксплуатационных показателей зубчатых колес и передач на их основе за счет снижения влияния погрешностей и деформаций на эксплуатационные параметры передач путем модификации боковой поверхности зубьев, исследование процессов формообразования зубчатых венцов с модифицированными зубьями и установление взаимосвязи между геометрией боковой поверхности зубьев, геометрией режущей кромки инструмента и траекторией его перемещения является актуальной научной задачей.

Цель работы: определение параметров траектории перемещения специально спрофилированного режущего инструмента при многокоординатной обработке пространственно-модифицированных зубьев цилиндрических колес методом копирования в зависимости от геометрии боковой поверхности зубьев и геометрии режущей кромки инструмента.

2. Основное содержание и результаты работы

В работе [10] представлены технологические способы формообразования зубьев методом копирования пальцевой и дисковой модульными фрезами. Разработаем для представленных способов методику определения параметров траектории перемещения специально спрофилированного режущего инструмента, при обработке зубчатых венцов с комплексной пространственной модификацией зубьев [1, 3, 4]. Последовательность выполнения расчетов по предлагаемой методике представлена на рис. 1. При

этом параметры траектории перемещения режущего инструмента определяются в зависимости от геометрии режущей кромки специально спрофилированного режущего инструмента и геометрии боковой поверхности зубьев нарезаемого зубчатого венца.

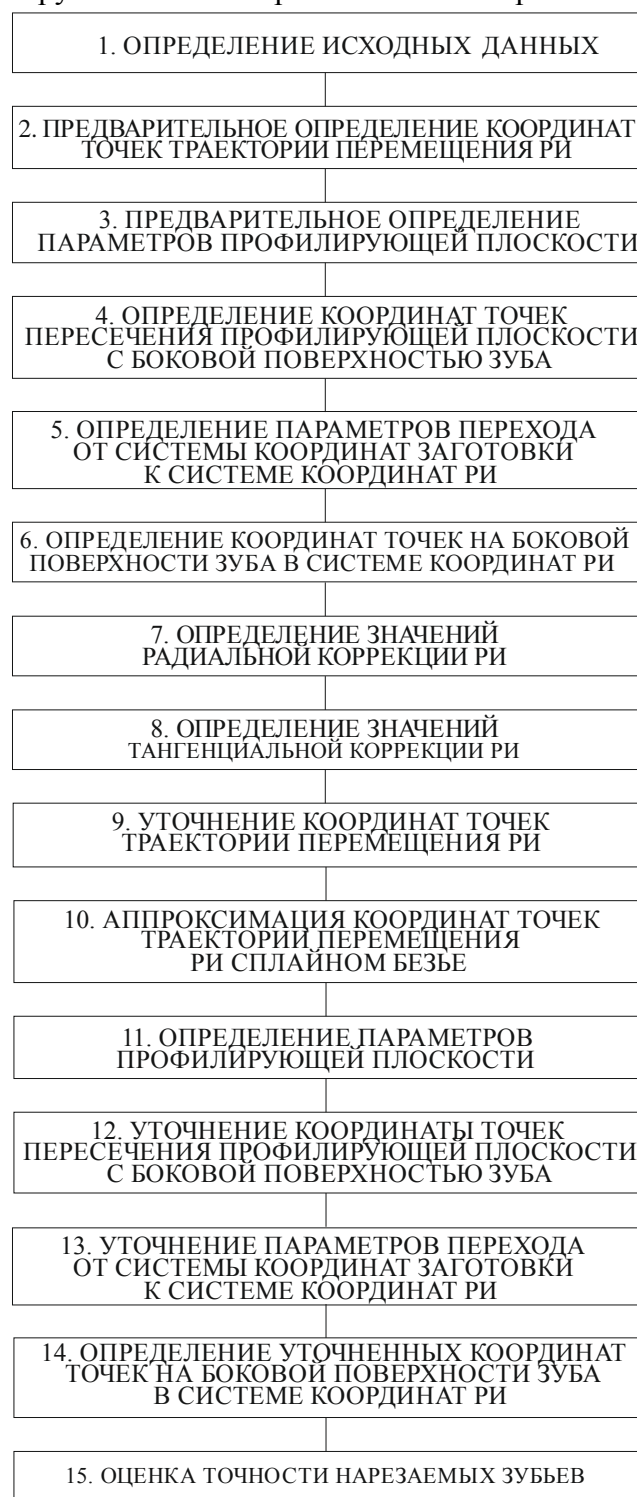


Рисунок 1. Методика определения параметров пространственной траектории перемещения специально спрофилированного режущего инструмента

Методика определения параметров траектории перемещения специально спрофилированного режущего инструмента содержит несколько последовательно выполняемых этапов.

В качестве исходных данных для определения параметров траектории перемещения режущего инструмента, работающего по методу копирования, является данные, полученные при выполнении аппроксимации геометрии боковой поверхности зуба с пространственной модификацией сплайнами Безье [11].

Координаты точек пространственной траектории перемещения режущего инструмента, на первом этапе, предварительно определяются исходя из максимального изменения толщины зуба и координаты по его высоте в сечении делительным цилиндром, в плоскостях симметрии и торца зубчатого венца:

$$\left. \begin{aligned} x_{mpi}^{np} &= x_{mp}^h + \Delta x \cdot i/n; \\ y_{mpi}^{np} &= y_{mp}^h - \Delta y \cdot i/n; \\ z_{mpi}^{np} &= \frac{b_w i}{2n}; i = 0, 1, \dots, n, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где x_{mp}^h и y_{mp}^h - координаты точки принадлежащей плоскости симметрии зубчатого венца;

Δx и Δy - соответственно максимальные отклонения по толщине и по высоте зуба координат точек на боковой поверхности зуба в сечении делительным цилиндром;

b_w - ширина зубчатого венца;

n – выбранное количество точек на траектории.

Задаваясь количеством точек на траектории, например $n=10$, по зависимости (1) рассчитывается распределение координат точек пространствен-

ной траектории перемещения режущего инструмента. Соединив точки отрезками, получаем пространственную ломаную, которая предварительно определяет геометрию пространственной траектории перемещения режущего инструмента (рис. 2).

Профиль режущего инструмента без искажения копируется в профилирующей плоскости [10], перпендикулярной траектории его перемещения. Координаты точек пересечения профилирующей плоскости с боковой поверхностью пространственно-модифицированного зуба определяются решением системы уравнений:

$$\left. \begin{aligned} x_1(\lambda) &= x_{n-k} \cdot (1-\lambda)^3 + 3 \cdot x_1 \cdot \lambda \cdot (1-\lambda)^2 + \\ &+ 3 \cdot x_2 \cdot \lambda^2 \cdot (1-\lambda) + x_{n-k} \cdot \lambda^3, \\ z_1(\lambda) &= z_{n-k} \cdot (1-\lambda)^3 + 3 \cdot z_1 \cdot \lambda \cdot (1-\lambda)^2 + \\ &+ 3 \cdot z_2 \cdot \lambda^2 \cdot (1-\lambda) + z_{n-k} \cdot \lambda^3, \\ A_{pi} \cdot x_1(\lambda) + B_{pi} \cdot y_{1teor} + C_{pi} \cdot z_1(\lambda) + D_{pi} &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где $x_1(\lambda)$ $z_1(\lambda)$ - координаты точки пересечения профилирующей плоскости с боковой поверхностью пространственно-модифицированного зуба;

λ - параметр сплайна, описывающего геометрию боковой поверхности зубьев;

$A_{pi}, B_{pi}, C_{pi}, D_{pi}$ - постоянные коэффициенты в уравнении профилирующей плоскости, проходящей через середину каждого отрезка траектории перемещения режущего инструмента определяются зависимостями:

$$\begin{aligned} A_{pi} &= x_{mpi+1}^{np} - x_{mpi}^{np}, \quad B_{pi} = y_{mpi+1}^{np} - y_{mpi}^{np}, \quad C_{pi} = z_{mpi+1}^{np} - z_{mpi}^{np}, \\ D_{pi} &= 0,5 \left[\left((x_{mpi}^{np})^2 + (y_{mpi}^{np})^2 + (z_{mpi}^{np})^2 \right) - \left((x_{mpi+1}^{np})^2 + (y_{mpi+1}^{np})^2 + (z_{mpi+1}^{np})^2 \right) \right]. \end{aligned} \quad (3)$$

Параметры перехода от системы координат шестерни к системе координат режущего инструмента определяются зависимостями [12]:

$$\alpha_{xi} = \arctan \left(\frac{B_{pi}}{C_{pi}} \right); \quad (4)$$

$$\alpha_{yi} = \arctan \left(\frac{A_{pi}}{B_{pi} \sin \alpha_{xi} + C_{pi} \cos \alpha_{xi}} \right). \quad (5)$$

Параметры перехода (4), (5) от системы координат шестерни к системе координат режущего инструмента определяются для каждой точки траектории его перемещения.

Координаты точек пересечения профилирующей плоскости с боковой поверхностью пространственно-модифицированного зуба, полученные в результате решения системы уравнений (2), приводятся к системе координат режущего инструмента, с учетом найденных углов α_x и α_y используя систему уравнений [12]:

$$\left. \begin{aligned} x_0 &= \cos \alpha_x x_1 - \sin \alpha_x \sin \alpha_y y_1 - \cos \alpha_x \sin \alpha_y z_1 + z_{cpi} \sin \alpha_y \cos \alpha_x - x_{cpi} \cos \alpha_y + \\ &+ y_{cpi} \sin \alpha_x \sin \alpha_y; \\ y_0 &= \cos \alpha_x y_1 - \sin \alpha_x z_1 + z_{cpi} \sin \alpha_x - y_{cpi} \cos \alpha_x; \\ z_0 &= \sin \alpha_y x_1 + \cos \alpha_y \sin \alpha_x y_1 + \cos \alpha_x \cos \alpha_y z_1 - x_{cpi} \sin \alpha_y - y_{cpi} \cos \alpha_y \sin \alpha_x - \\ &- z_{cpi} \cos \alpha_x \cos \alpha_y. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Для всех точек по высоте зуба шестерни определяются:

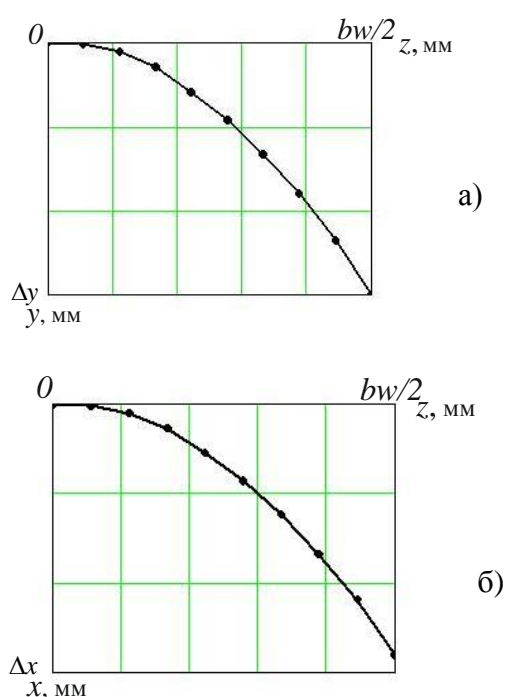


Рисунок 2. Предварительные результаты расчета координат точек траектории перемещения инструмента: а – проекция на плоскость yOz ; б – проекция на плоскость xOz

где x_{0i}^{cp}, y_{0i}^{cp} - координаты i точки, принадлежащей режущей кромке специально спрофилированного режущего инструмента;

x_{ui}, y_{ui} - координаты i опорной точки сплайна.

λ_{ui} - i параметр сплайна.

Для уточнения геометрии пространственной траектории вводятся значения радиальной и тангенциальной коррекции положения режущего инструмента.

Значение радиальной коррекции для специально спрофилированного режущего инструмента определяется решением системы уравнений (9) с учетом того, что координата по высоте зуба шестерни изменяется на величину коррекции. А в левую часть системы уравнений (9) подставляются координаты точек, принадлежащих боковой поверхности зуба шестерни, приведенные к системе координат режущего инструмента по зависимостям (6):

$$\left. \begin{aligned} x_{0i} &= (1 - \lambda_{ui})^3 x_{00}^{cp} + 3 \cdot (1 - \lambda_{ui})^2 \lambda_{ui} x_{u1} + 3 \cdot (1 - \lambda_{ui}) \lambda_{ui}^2 x_{u2} + \lambda_{ui}^3 x_{0n}^{cp}; \\ y_{0i} &= (1 - \lambda_{ui})^3 y_{00}^{cp} + 3 \cdot (1 - \lambda_{ui})^2 \lambda_{ui} y_{u1} + 3 \cdot (1 - \lambda_{ui}) \lambda_{ui}^2 y_{u2} + \lambda_{ui}^3 y_{0n}^{cp} + k_{rj}. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

Значение тангенциальной коррекции для специально спрофилированного инструмента определяется по зависимости:

$$k_{rj} = 0,5(\delta x_{00} + \delta x_{0n}). \quad (11)$$

- средние арифметические значения

$$x_{0i}^{cp} = \frac{\sum_{j=0}^m x_{0i,j}}{n}, \quad (7)$$

$$y_{0i}^{cp} = \frac{\sum_{j=0}^m y_{0i,j}}{n},$$

- средние квадратичные отклонения

$$\sigma x_{0i} = \frac{\sum_{j=0}^m (x_{0i,j} - x_{0i}^{cp})^2}{n - 1}, \quad (8)$$

$$\sigma y_{0i} = \frac{\sum_{j=0}^m (y_{0i,j} - y_{0i}^{cp})^2}{n - 1},$$

где m - количество сплайнов, выбранное для описания геометрии боковой поверхности зуба шестерни по длине зуба [11].

Геометрия режущей кромки специально спрофилированного режущего инструмента может быть аппроксимирована сплайнами Безье вида:

$$\left. \begin{aligned} x_{0i}^{cp} &= (1 - \lambda_{ui})^3 x_{00}^{cp} + 3 \cdot (1 - \lambda_{ui})^2 \lambda_{ui} x_{u1} + \\ &+ 3 \cdot (1 - \lambda_{ui}) \lambda_{ui}^2 x_{u2} + \lambda_{ui}^3 x_{0n}^{cp}; \\ y_{0i}^{cp} &= (1 - \lambda_{ui})^3 y_{00}^{cp} + 3 \cdot (1 - \lambda_{ui})^2 \lambda_{ui} y_{u1} + \\ &+ 3 \cdot (1 - \lambda_{ui}) \lambda_{ui}^2 y_{u2} + \lambda_{ui}^3 y_{0n}^{cp}. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

где δx_{00} и δx_{0n} - отклонение толщины зуба для верхней и нижней точек профиля:

$$\delta x_{0i} = x_{0i}^{meop} - x_{0i}. \quad (12)$$

где x_{0i}^{meop} - координаты по толщине зуба, соответствующие теоретическим значениям толщины в граничных точках профиля зуба:

$$x_{0i} = (1 - \lambda_{ui})^3 x_{00}^{cp} + 3 \cdot (1 - \lambda_{ui})^2 \lambda_{ui} x_{u1} + 3 \cdot (1 - \lambda_{ui}) \lambda_{ui}^2 x_{u2} + \lambda_{ui}^3 x_{0n}^{cp} \quad (13)$$

где λ_{ui} - параметры сплайна λ_{u0} и λ_{un} для граничных точек кривой пересечения боковой поверхности зуба с профилирующей плоскостью, которые определяются в результате решения системы уравнений:

$$\left. \begin{aligned} y_{00} &= (1 - \lambda_{u0})^3 y_{00}^{cp} + 3 \cdot (1 - \lambda_{u0})^2 \lambda_{u0} y_{u1} + 3 \cdot (1 - \lambda_{u0}) \lambda_{u0}^2 y_{u2} + \lambda_{u0}^3 y_{0n}^{cp} + k_{ri}; \\ y_{0n} &= (1 - \lambda_{un})^3 y_{00}^{cp} + 3 \cdot (1 - \lambda_{un})^2 \lambda_{un} y_{u1} + 3 \cdot (1 - \lambda_{un}) \lambda_{un}^2 y_{u2} + \lambda_{un}^3 y_{0n}^{cp} + k_{ri}. \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

Координаты точек реально нарезаемой кривой профиля определяются в соответствии с системой уравнений:

$$\left. \begin{aligned} x_{0i,j}^{nap} &= (1 - \lambda_{ui})^3 x_{00}^{cp} + 3 \cdot (1 - \lambda_{ui})^2 \lambda_{ui} x_{u1} + 3 \cdot (1 - \lambda_{ui}) \lambda_{ui}^2 x_{u2} + \lambda_{ui}^3 x_{0n}^{cp} - k_{ij}, \\ y_{0i,j}^{nap} &= (1 - \lambda_{ui})^3 y_{00}^{cp} + 3 \cdot (1 - \lambda_{ui})^2 \lambda_{ui} y_{u1} + 3 \cdot (1 - \lambda_{ui}) \lambda_{ui}^2 y_{u2} + \lambda_{ui}^3 y_{0n}^{cp} + k_{ij}. \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

На втором этапе определяются уточненные координаты точек пространственной траектории перемещения режущего инструмента с учетом ранее найденных значений радиальной и тангенциальной коррекций положения режущего инструмента:

$$\left. \begin{aligned} x_i^{mp} &= x_{mpi}^{np} - k_{ii}; \\ y_i^{mp} &= y_{mpi}^{np} + k_{ri}; \\ z_i^{mp} &= z_{mpi}^{np}. \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

Аппроксимация координат точек пространственной траектории перемещения режущего инструмента осуществляется сплайном Безье третьего порядка [12]:

$$\left. \begin{aligned} x_i^{mp} &= (1 - \lambda_i^{mp})^3 x_0^{mp} + 3 \cdot (1 - \lambda_i^{mp})^2 \lambda_i^{mp} x1_{mp} + 3 \cdot (1 - \lambda_i^{mp}) \lambda_i^{mp2} x2_{mp} + \lambda_i^{mp3} x_n^{mp}; \\ y_i^{mp} &= (1 - \lambda_i^{mp})^3 y_0^{mp} + 3 \cdot (1 - \lambda_i^{mp})^2 \lambda_i^{mp} y1_{mp} + 3 \cdot (1 - \lambda_i^{mp}) \lambda_i^{mp2} y2_{mp} + \lambda_i^{mp3} y_n^{mp}; \\ z_i^{mp} &= (1 - \lambda_i^{mp})^3 z_0^{mp} + 3 \cdot (1 - \lambda_i^{mp})^2 \lambda_i^{mp} z1_{mp} + 3 \cdot (1 - \lambda_i^{mp}) \lambda_i^{mp2} z2_{mp} + \lambda_i^{mp3} z_n^{mp}, \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

где $x_i^{mp}, y_i^{mp}, z_i^{mp}$ - координаты i точки траектории перемещения режущего инструмента;

$x_0^{mp}, y_0^{mp}, z_0^{mp}$ и $x_n^{mp}, y_n^{mp}, z_n^{mp}$ - координаты точек начала и конца траектории перемещения режущего инструмента;

$x1_{mp}, y1_{mp}, z1_{mp}$ и $x2_{mp}, y2_{mp}, z2_{mp}$ - координаты опорных точек сплайна;

λ_i^{mp} - i параметр сплайна.

Уточняющие расчеты координат точек пересечения профилирующей плоскости с боковой поверхностью пространственно-модифицированного зуба выполняются с использованием системы уравнений (2) с учетом параметров плоскости, перпендикулярной пространственной кривой траектории перемещения режущего инструмента [12]. Параметры перехода α_x и α_y от системы координат шестерни к системе координат режущего инструмента рассчитываются с использованием зависимостей (4) и (5). После чего уточненные значения координат точек пересечения профилирующей плоскости с бо-

ковой поверхностью пространственно-модифицированного зуба приводятся к системе координат режущего инструмента по зависимостям (6) и выполняется уточнение зависимостей, описывающих геометрию режущей кромки специально спрофилированного инструмента по зависимостям (9).

Качество выполненных расчетов по определению параметров пространственной траектории перемещения режущего инструмента проверяется оценкой точности получения координат боковой поверхности пространственно-модифицированного зуба шестерни. Для чего выполняется сравнение теоретических значений координат точек на боковой поверхности пространственно-модифицированного зубьев с координатами, которые будут получены при обработке в случае перемещении режущего инструмента относительно заготовки по рассчитанной траектории без учета деформаций элементов системы СПИД.

3. Выводы

Разработана методика определения параметров пространственной траектории перемещения специально спрофилированного режущего инструмента, работающего по методу копирования, при обработке зубчатых венцов с пространственно-модифицированными зубьями. Реализация методики позволяет определять координаты узловых точек траектории перемещения режущего инструмента в процессе многокоординатной обработки пространственно-модифицированных зубьев цилиндрических колес на станках с ЧПУ. Для специально спрофилированного инструмента получены зависимости по определению геометрии его режущей кромки в зависимости от геометрии боковой поверхности зубьев. Результаты, полученные при разработке методики определения параметров траектории перемещения режущего инструмента, могут в дальнейшем быть использованы при расчетах, связанных с назначением режимных параметров обработки. Применение предложенной методики по определению параметров пространственной траектории перемещения специально спрофилированного режущего инструмента позволяет повысить точность многокоординатного фрезерования зубчатых венцов за счет аналитического описания взаимосвязи геометрии боковой поверхности пространственно-модифицированных зубьев, геометрии режущей кромки инструмента и траектории перемещения режущего инструмента относительно заготовки.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Грубка, Р. М. Синтез пространственных геометрий зубьев цилиндрических колес, работающих при наличии погрешностей и деформаций элементов передач [Текст] / Р. М. Грубка, И. А. Петряева, А. Н. Михайлов, А. А. Бочаров // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научных трудов. – Донецк: ДонНТУ, 2018. – Вып. 4 (63). – С. 17 - 27.

2. Грубка, Р. М. Конструктивные способы повышения эксплуатационных показателей цилиндрических зубчатых передач [Текст] / Р. М. Грубка // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научных трудов. - Донецк: Донецкий национальный технический университет, 2019. – Вып. 1(64). – С. 17 - 22.

3. Пат. 2 713 537 Рос. Федерация, МКП7 F16H 1/04 (2006.01). Зубчатое соединение с внешним зацеплением зубьев / Р. М. Грубка (UA), Н. С. Пичко (RU), А. Н. Михайлов (UA), И. А. Петряева (UA); заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Ухтинский государственный технический университет" (ФГБОУ ВО УГТУ) (RU) – № 2019104782; заявл. 20.02.19; опубл. 05.02.20, Бюл. № 4 – 11 с. : ил.

4. Пат. 2713 691 Рос. Федерация, МКП7 F16H 1/10 (2006.01) F16D 3/18 (2006.01). Зубчатое соединение с внутренним зацеплением зубьев / Р. М. Грубка (UA), Н. С. Пичко (RU), А. Н. Михайлов (UA), И. А. Петряева (UA); заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Ухтинский государственный технический университет" (ФГБОУ ВО УГТУ) (RU) – № 2019104785, заявл. 10.04.19; опубл. 06.02.20, Бюл. № 4 – 13 с. : ил.
5. Калашников, А. С. Технология изготовления зубчатых колес [Текст] / А. С. Калашников. – М.: Машиностроение, 2004. – 480 с.
6. Грубка, Р. М. Методика определения параметров для настройки зубофрезерного станка при фрезеровании зубьев втулок зубчатых муфт с пространственной геометрией [Текст] / Р. М. Грубка, А. Н. Михайлов, С. И. Лучко // Прогресивні технології і системи-машинобудування: Міжнародний зб. Наукових праць. – Донецьк: Донец.нац. техн. ун-т, 2011. – Вып. 41. – С. 112-118.
7. Грубка, Р. М. Фрезерование зубьев втулок муфт с геометрией приближенной к групповой пространственной методом обкатки на существующем серийном оборудовании [Текст] / Р. М. Грубка, А. Н. Михайлов, Л. Н. Феник, С. И. Лучко // Прогресивні технології і системи машинобудування: Міжнародний зб. Наукових праць. – Донецьк: Донец.нац. техн. ун-т, 2011. – Вып. 42. – С. 98-103.
8. Грубка, Р. М. Классификация движений при многокоординатном зубофрезеровании пространственно-модифицированных зубьев цилиндрических зубчатых колес методом копирования [Текст] / Р. М. Грубка, А. Н. Михайлов, И. А. Петряева // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научных трудов. – Донецк: Донец. нац. техн. ун-т, 2019. – Вып. 3(66). – С. 16 - 21.
9. Грубка, Р. М. Повышение надежности, долговечности и нагрузочной способности цилиндрических зубчатых передач на базе комплексного функционально-ориентированного конструкторско-технологического подхода [Текст] / Р. М. Грубка // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научных трудов. – Донецк: ДонНТУ, 2018. – Вып. 2 (61). – С. 15 - 22.
10. Грубка, Р. М. Зубофрезерование методом копирования цилиндрических колес с пространственно-модифицированными зубьями / Р. М. Грубка, А. Н. Михайлов, А. В. Стёпочкина, И. А. Гуричев // Перспективные направления развития отделочно-упрочняющей обработки и виброволновых технологий [Электронный ресурс]: сб. тр. науч. семинара / под ред. В.А. Лебедева; Донской гос. техн. ун-т. – Электрон. текстовые дан. – Ростов-на-Дону: ДГТУ, 2021. – С. 117 - 122.
11. Some features of the design and technological preparation of the production of spur gears with spatially modified teeth / R.M. Grubka, N.S. Pichko, I.A. Petryayeva, A.N. Mikhailov // Materials Today: Proceedings. – 2019. - Volume 19. Part 5: International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment 2019. – P. 2483-2487.
12. Грубка, Р. М. Определение параметров перехода между системами координат режущего инструмента и заготовки при многокоординатной обработке цилиндрических колес [Текст] / Р. М. Грубка // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научных трудов. – Донецк: ДонНТУ, 2021. – Вып. 2 (73). – С. 29 - 35.

Поступила в редколлегию 21.01.23 г.

УДК 621.787.4

Зайдес С. А., д-р техн. наук, проф., **Хо Минь Куан**, аспирант
Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия
Тел. / Факс: +7 904 820 08 54; E-mail: minhquanho2605@gmail.com

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ПРИ МАЯТНИКОВОМ ПОВЕРХНОСТНОМ ПЛАСТИЧЕСКОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ

На основе моделирования термического процесса с помощью программы Ansys 19.1. представлено влияние основных технологических параметров и режимов маятникового поверхностного пластического деформирования (ППД) на температуру в зоне контакта. Показано распределение температурных полей в рабочем инструменте и в заготовке.

Ключевые слова: поверхностное пластическое деформирование, секториальный рабочий инструмент, термический процесс, компьютерное моделирование, поверхностный слой.

Zaides S.A., Ho Minh Quan

SIMULATION OF THE THERMAL PROCESS WITH A PENDULUM SURFACE PLASTIC DEFORMATION

Based on thermal process simulation using Ansys 19.1. the influence of the main technological parameters and modes of pendulum surface plastic deformation (SPD) on the temperature in the contact zone is presented. The distribution of temperature fields in the working tool and in the workpiece is shown.

Keywords: surface plastic deformation, sectorial working tool, thermal process, computer simulation, surface layer.

1. Введение

В металлообрабатывающей промышленности широко используют горячекатаный и холоднотянутый сортовой прокат в виде эффективных заготовок для изготовления длинномерных деталей типа валов и осей. Калиброванный прокат круглого поперечного сечения успешно используют и для изготовления разнообразных деталей на станках-автоматах и автоматических линиях, где необходимы заготовки с достаточно точными диаметральными размерами для закрепления их в цанговых патронах металлорежущих станков [1-2].

Надежность изделий машиностроения во многом зависит от качества изготовления отдельных деталей, которое оценивается состоянием поверхностного слоя. Именно поверхностный слой деталей в первую очередь подвергается силовым и температурным воздействиям, именно поверхностный слой испытывает влияние коррозионных сред, контактных давлений, сил трения и др. внешних воздействий. Таким образом, работоспособность деталей машин зависит от качества поверхностного слоя, который можно значительно улучшить, применяя на окончательных механических операциях отделочно-упрочняющую обработку поверхностным пластическим деформированием (ППД) [3].

В процессе пластического деформирования совершается работа, затрачиваемая непосредственно на деформирование металла и работа, связанная с трением в зоне контакта заготовки с рабочим инструментом. При механической обработке выделяется тепло, которое расходуется на нагрев заготовки, рабочего инструмента и теплоотдачу в окружающую среду [4].

Исследования температурных полей показывают, что при ППД при малых глубинах упрочнения практически все тепло образуется за счет деформации металла [5, 6]. Пластическая деформация сопровождается упрочнением металла, величина которого оценивается по результатам изменения твердости или микротвердости поверхностного

слоя. Тепловые явления в очаге деформации при определенных температурных условиях могут снизить результаты, достигнутые ППД – уменьшить величину остаточных напряжений и степень наклепа.

При ППД тепло формируется в очаге деформации и при интенсивных режимах обработки образуются термопластические напряжения. Эти напряжения, складываясь с напряжениями, вызванными от собственной пластической деформации, изменяют их величину, а иногда и характер распределения.

Интенсивное давление в зоне контакта и силы трения могут сформировать достаточное высокое температурное поле, которые могут вызвать изменение структуры материала. Так, при алмазном выглаживании при высоких скоростях обработки температура в зоне контакта может достигать 600 – 850С [7, 8]. При такой температуре происходят не только структурные изменения в упрочняющем слое, но и повреждение рабочего инструмента (алмаза).

Чтобы сохранить механические свойства материала, достигнутые поверхностным деформированием, на практике обычно обработку ППД ведут на низких режимах, которые отрицательно сказываются на производительности технологического процесса обработки [9].

Таким образом, с учетом вышеизложенного, технологические задачи должны решаться с учетом температурных полей, образующиеся при механической обработке. Авторами статьи разработан новый способ ППД, основанный на маятниковом движении секториального рабочего инструмента [10], влияние которого на температурные процессы представляют интерес для определения НДС упрочненного слоя с учетом температурного воздействия на материал заготовки.

Целью данной работы является определение температуры в очаге деформации в зависимости от основных технологических параметров маятникового поверхностного пластического деформирования.

Кинематическая схема процесса. Для обеспечения интенсификации напряженного состояния в очаге деформации, которое позволит снизить величину радиального натяга при обработке нежестких цилиндрических деталей типа валов и осей, авторами статьи разработан новый способ ППД [10], основанный на маятниковом воздействии секториального рабочего инструмента (рис. 1). Особенность новой кинематики деформирующего инструмента заключается в том, что поверхностное пластическое деформирование осуществляется за счет поочередных процессов качения и скольжения рабочего инструмента.

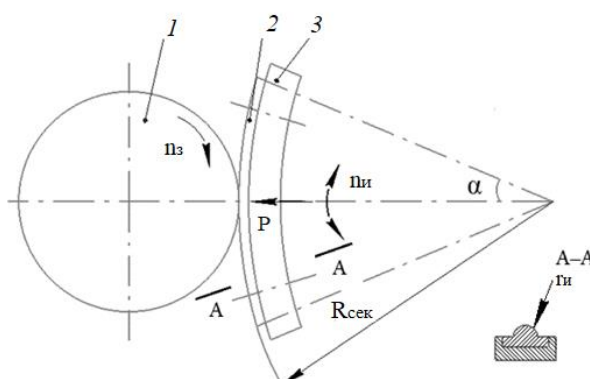


Рисунок 1. Кинематическая схема маятникового ППД
1-заготовка, 2-деформирующий элемент, 3-рабочий сектор инструмента.

2. Методика моделирования термопроцесса при маятниковом ППД.

Для определения температуры в зоне контакта рабочего инструмента с заготовкой с помощью компьютерной программы моделирования ANSYS 19.1 необходимо использовать вкладку Custom Systems и выбрать опцию thermal-Stress (термо-стрессовый анализ), которая позволяет объединить заданные и тепловые и механические параметры в одну задачу [11-12] (см. рис. 2).

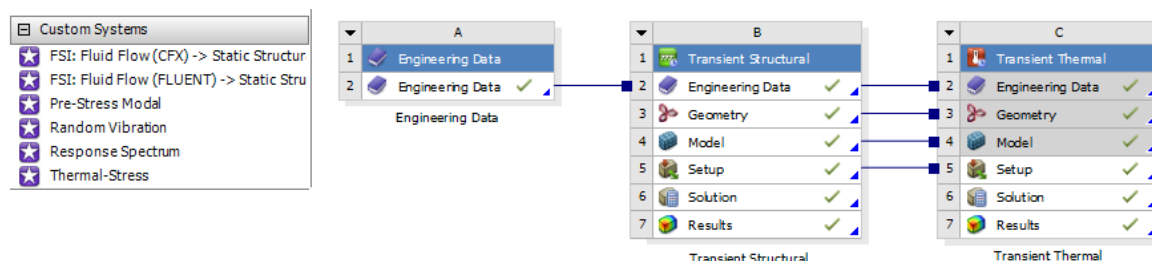


Рисунок 2. Модель объединения структурного и термического анализа в ANSYS 19.1

Модуль термического моделирования автоматически принимает заданные свойства конечно-элементной модели в динамической задаче, результаты которой отражаются в работе [13] такие как: механические характеристики материала заготовки и рабочего инструмента (Engineering data), геометрические параметры (geometry), расчетные модули (model), краевые условия (setup) [12].

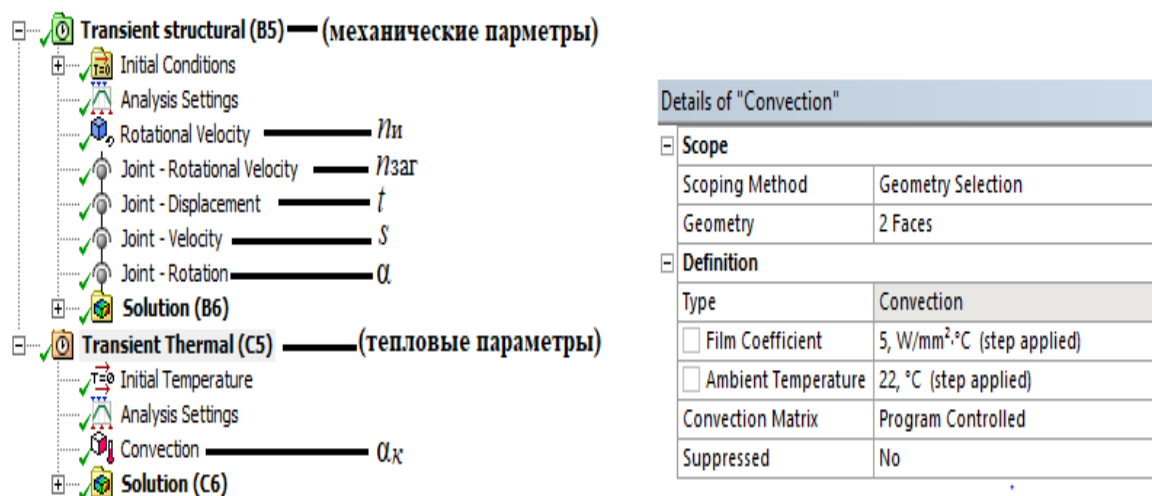


Рисунок 3. механические и термические параметры процесса маятникового ППД

Для определения температуры в зоне контакта кроме условий, характеризующих кинематику процесса маятникового ППД и трения, которые настроены на этапе динамического моделирования необходимо задать условие конвекции и окружающей среды (см. рис. 3). Прията естественная конвекция $\alpha_k = 5$ Вт/мм².°С; температура окружающей среды $t^0 = 22^{\circ}\text{C}$. Маятниковое ППД моделировалось с базовыми параметрам, представленными в табл. 1.

Таблица 1. Значения базовых параметров упрочнения

| n_3 ОБ/МИН | $n_{ин}$, ДВ.Х/МИН | t , ММ | s , ММ/ОБ | $r_{и}$, ММ | $R_{сек}$, ММ | α , ГРАД |
|--------------|---------------------|----------|-------------|--------------|----------------|-----------------|
| 100 | 100 | 0,1 | 0,1 | 5 | 25 | 30 |

3. Результаты компьютерного моделирования.

На рис. 4 представлено распределение температурных полей в очаге деформации, которые показывают, что максимальная температура, возникает в зоне контакта в результате воздействия рабочего инструмента с заготовкой и постепенно уменьшается к противоположному краю поперечного сечения цилиндра (см. рис. 4, а).

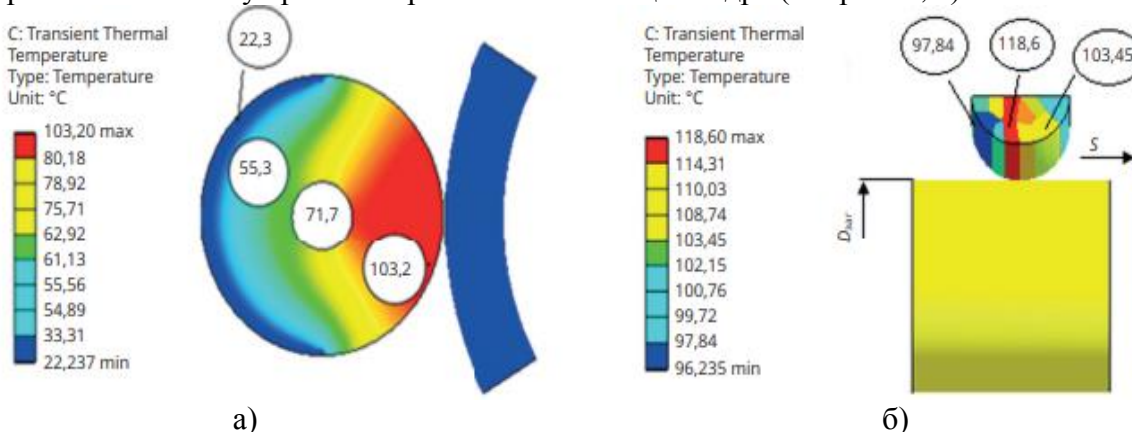


Рисунок 4. Распределение температурных полей в зоне контакта в заготовке (а) и в рабочем инструменте (б)

Следует отметить, что при маятниковом ППД в условиях базовых режимов обработки в зоне контакта формируется максимальная температура равная, примерно, 101-105 С°, которая уменьшается в направлении к центру цилиндрической заготовки. При этом максимальная температура в рабочем инструменте почти на 20-30% больше, чем в заготовке, и формируется она в зоне контакта, противоположной направлению подачи.

На рис. 5 представлено влияние величины натяга и продольной подачи на температуру в зоне контакта при маятниковом ППД. Установлено, что температура в зоне контакта рабочего инструмента с заготовкой повышается при увеличении величины натяга от 0,05 до 0,4 мм и достигает от 65 до 145°С. Величина радиального натяга влияет на величину давления в зоне контакта, что непосредственно сказывается и на температуре инструмента и заготовки.

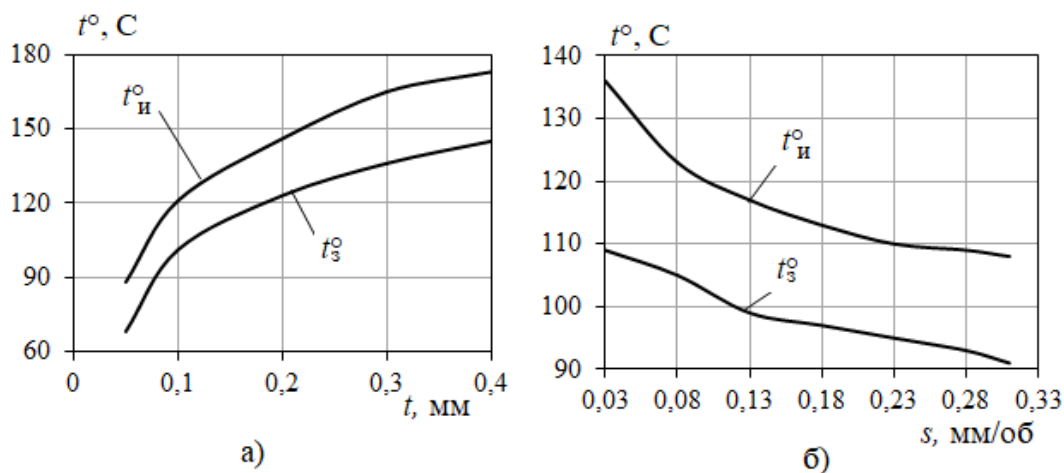


Рисунок 5. Влияние величины натяга (а) и величины продольной подачи (б) на температуру в зоне контакта

При этом повышение продольной подачи приводит к снижению температуры в зоне контакта. Кроме того, следует отметить, что при изменении величины подачи в интервале 0,13-0,33 мм/об температура в зоне контактная изменяется в небольшом диапазоне. Это происходит потому, что при определенной величине подачи происходит меньшая степень перекрытия пластических следов от действия рабочего инструмента, что непосредственно связано с уменьшением степени аккумуляции тепла в очаге деформации.

На рис. 6 представлено влияние частоты вращения заготовки и частоты маятникового движения рабочего инструмента на максимальную температуру в зоне контакта. Следует отметить, что значительное изменение температуры (варьируется в диапазоне 75 - 140°C) в зоне контакта происходит вследствие изменения частоты вращения заготовки и частоты маятникового движения рабочего инструмента, причем с их увеличением температура заготовки и инструмента повышается (см. рис. 6).

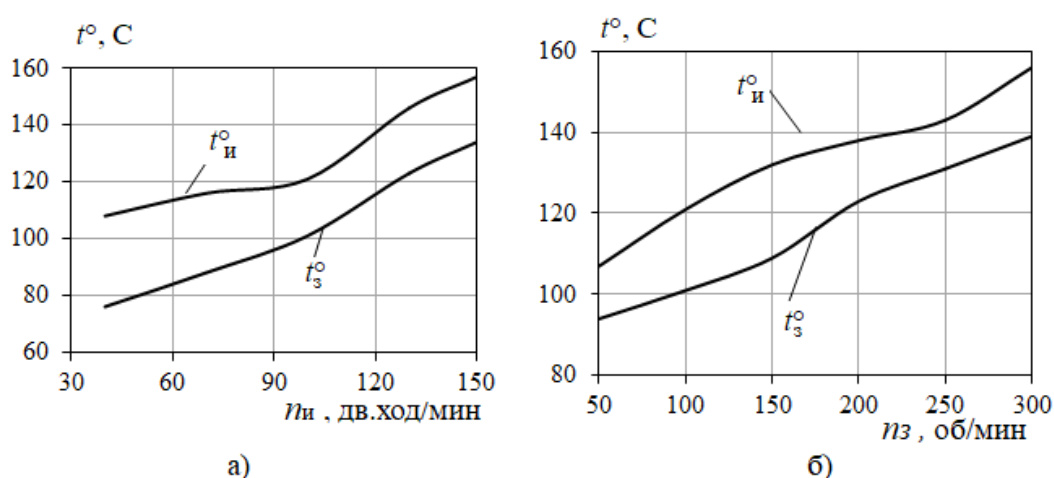


Рисунок 6. Влияние частоты маятникового движения рабочего инструмента (а) и частоты вращения заготовки (б) на температуру в зоне контакта

Полученные значения температуры, возникающей в очаге упругопластической деформации при маятниковом ППД, следует учитывать при определении остаточных напряжений, так как повышение температуры в зоне контакта может привести к восстановлению искаженной кристаллической решетки металла, а это скажется не только на снижении величины сжимающих остаточных напряжений, но и степени упрочнения поверхностного слоя.

4. Заключение.

Полученные результаты компьютерного моделирования для определения температуры в очаге деформации позволяют сделать следующие выводы:

1. При маятниковом ППД в зоне контакта рабочего инструмента с заготовкой возникает температура, максимальное значение которой составляет 101-105°C при базовых режимах обработки. Температура, возникающая в рабочем инструменте при всех режимах обработки больше, чем в заготовке на 20-30%.

2. Величина температуры в зоне упругопластической деформации при маятниковом ППД изменяется в пределах от 65 до 145°C и зависит от основных технологических параметров процесса (частота вращения заготовки, частота маятникового движения рабочего инструмента, а также величина натяга и величина

продольной подачи). Увеличение величины подачи приводит к незначительному снижению температуры в очаге деформации от (110 до 90С°).

ЛИТЕРАТУРА:

1. Ning Nie, Lihong Su, Guanyu Deng, Huijun Li, Hailiang Yu, Anh Kiet Tieu. A review on plastic deformation induced surface/interface roughening of sheet metallic materials // *Journal of Materials Research and Technology* 2021; 15: 6574-6607, <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.11.087>
2. Sunal Ahmet Parasiz, Yasin Kuddusi Kutucu, Onur Karadag. On the utilization of Sachs model in modeling deformation of surface grains, for micro/meso scale deformation processes // *Journal of Manufacturing Processes* 68 (2021) 1086-1099. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.06.033>
3. Кабатов, А. А. Анализ финишных методов обработки поверхностным пластическим деформированием / А. А. Кабатов // *Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии*. – 2013. – № 58. – С. 49–54.
4. Drachev, O. I. Improving the accuracy of machining of non-rigid shaft / Drachev O. I. Bobrovskii A. V., Zotov A. V. // *MATEC web of Conferences*. – 2018. – Vol. 224. – Article 01085. <https://doi.org/10.1051/matecconf/201822401085>
5. Отений, Я. Н. Температура в контактной зоне при обработке деталей поверхностным пластическим деформированием / Я. Н. Отений // *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*. №2. – 2006. – С. 57-62.
6. Shen Li, Do Kyun Kim, Simon Benson. The influence of residual stress on the ultimate strength of longitudinally compressed stiffened panels // *Ocean Engineering*. – vol. 231. – 2021. – ISSN 0029-8018. – <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.108839>
7. Резников, А. Н. Тепловые процессы в технологических системах: учебник для вузов / А. Н. Резников, Л. А. Резников. – Машиностроение, 1990. – 288 с.
8. Резников, А. Н. Абразивная и алмазная обработка материалов: Справочник / Е. И. Алексенцев, А. Н. Резников. – М.: Машиностроение, 1977. – 391 с.
9. Скуратов, Д. Л. Теплофизика процесса алмазного выглаживания / Д. Л. Скуратов, А. Н. Швецов, А. Д. Веколов // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. – Т22(№4). – 2020. – С. 34-49.
10. Пат. 2757643 RU. Способ поверхностно-пластического деформирования наружной поверхности детали в виде тела вращения / Зайдес С. А., Хо Минь Куан.; заяв 04.02.21; опубл. 19.10.21.
11. Ильичева, О. А. Технология логического моделирования и анализа сложных систем / О. А. Ильичева // *Инженерный вестник Дона*. – 2012. – №4. – С.13-35. – URL: ivdon.ru/magazine/archive/n4p2y2012/1234.
12. Соболев, А. Н. Исследование процессов пластического деформирования с использованием пакета ANSYS/ED5.6. [Текст] / А. Н. Соболев. // *Автоматизация и управление в машиностроении*. – 2001. – №16. – С. 32–46.
13. Зайдес, С. А. Определение напряженно-деформированного состояния цилиндрических деталей при круговой осцилляции секториального рабочего инструмента. / С. А. Зайдес, Хо Минь Куан // *Упрочняющие технологии и покрытия*. – 2022. – №1. – Т. 18. – С. 6-13. – <https://doi.org/10.36652/1813-1336-2022-18-1-6-13>.

Поступила в редколлегию 09.02.2023 г.

УДК 669.018.44

В. А. Коровин, д-р тех. наук, проф., **И. О. Леушин** д-р тех. наук, проф.,

С. В. Беляев, канд. техн. наук, доцент,

Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева,
г. Нижний Новгород, ул. Минина 24, 603155;

А. И. Демченко, канд. техн. наук, нач. производства, **М. С. Хацько**, инженер,
ПАО «Русполимет», Нижегородская обл., г. Кулебаки, ул. Восстания д. 1, 607010;

А. Г. Панов, д-р тех. наук, проф.

Набережночелнинский институт Казанского федерального университета, Республика
Татарстан, г. Набережные Челны, проспект Мира, д. 68 / 19, 423812.

Тел./Факс: +7(831) 436-43-95; E-mail: mto@nntu.ru

ВЛИЯНИЕ ФИЛЬТРАЦИОННОГО РАФИНИРОВАНИЯ НА МИКРОСТРУКТУРУ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СПЛАВ ВЖ-159

Литературный анализ показал, что фильтрация расплава является эффективным способом уменьшения количества неметаллических включений в расплаве и повышения уровня механических свойств готовой отливки. Была проведена плавка экспериментальной плавки сплава ВЖ-159. Отливка одной заготовки осуществлялась через двойной пенокерамический фильтр, а другой без фильтра. Из каждой заготовки были отобраны образцы для микроструктурного анализа. Микроструктурный анализ проводили с помощью микроскопа NEOPHOT 32. Установлено, что применение технологии фильтрации на сплаве ВЖ-159 позволяет очистить металл от крупных оксидных неметаллических включений. Было установлено, что применение технологии фильтрации на сплаве ВЖ-159 позволяет повысить комплекс механических свойств заготовки до уровня от 4 до 15%.

Ключевые слова: механические свойства, неметаллические включения, сплав ВЖ-159, фильтрация, микроструктура металла.

V. A. Korovin, I. O. Leushin, S. V. Belyaev, A. I. Demchenko, M. S. Khatsko, A. G. Panov

THE EFFECT OF FILTRATION REFINING ON MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF THE VJ-159 ALLOY

The analysis of literature data was carried out. It is shown that filtration of the melt is an effective way to reduce the amount of non-metallic inclusions in the melt and increase the level of mechanical properties in the finished casting. Smelting of experimental melting of VZ-159 alloy was carried out, casting of one billet was carried out through a double ceramic foam filter, and the other without a filter. Templates were selected from each blank for microstructural analysis. Microstructural analysis was carried out using a NEOPHOT 32 microscope. It has been established that the use of filtration technology on the VZ-159 alloy allows cleaning the metal from large oxide non-metallic inclusions. It was found that the use of filtration technology on the VZ-159 alloy makes it possible to increase the complex of mechanical properties of the workpiece to a level from 4 to 15%.

Keywords: mechanical properties, non-metallic inclusions, VZ-159 alloy, filtration, metal microstructure.

1. Введение.

Широкая применяемость сплава ВЖ-159 в авиационной и атомной промышленности обусловлена высоким комплексом служебных характеристик при комнатной до повышенной температурах этого сплава. Повышенный уровень служебных свойств диктует особые условия производства заготовок из данного сплава. Так, при выплавке используются только «чистые» материалы, в противном случае есть риск снижения служебных характеристик. Такая технология производства приводит к росту расходов на производство заготовок. Одним из способов снижения себестоимости производства заготовок является вовлечение отходов в переплав [1-3]. Однако такой путь может привести к снижению служебных характеристик [4] полученных изделий вследствие

накопления примесных элементов [5-9], поэтому совместно с вовлечением дополнительного количества литейных отходов применяют [10-15] фильтрационное рафинирование.

Состояние вопроса.

Известно [15-19], что фильтрационное рафинирование позволяет снизить количество неметаллических включений в готовом металле, оказывая тем самым существенное влияние на микроструктуру и механические свойства полученных заготовок. В вышеуказанных и других работах отмечено положительное влияние фильтрации на служебные характеристики полученной продукции, однако сообщений о фильтрации такого востребованного сплава, как ВЖ-159 нет. Поэтому целью работы явилось сравнение микроструктуры и механических свойств двух заготовок из сплава ВЖ-159 – подверженную фильтрации и разлитую по стандартной технологии.

2. Экспериментальная часть.

В качестве объекта исследования был выбран жаропрочный сплав на никелевой основе ВЖ-159, выплавляемый на ПАО «Русполимет». Требования к механическим свойствам данного сплава представлены в таблице 1. Выплавка производилась в вакуумно-индукционной печи ВИП-3,0 емкостью 4,6 тонн. В качестве шихтовых материалов выступали марочные отходы в количестве 30% от массы завалки, остальное чистые материалы. При расплавлении и легировании поддерживался уровень вакуума 0,5-2,5 Па. Разливка проводилась в среде аргона при давлении 8-10 МПа. Разливка осуществлялась через специальное разливочное устройство – промковш, изготовленный из керамики с содержанием корунда более 90%. Разливочное устройство подогревалось до температуры 1200°C для исключения замерзания металла. Время от окончания нагрева до начала разливки составляет менее 15 минут. Температура металла перед разливкой составила 1520°C.

Таблица 1. – Механические свойства сплава ВЖ-159 при комнатной температуре по СТО 78721433-048 (закалка и двукратное старение)

| Временное сопротивление, МПа, σ_b | Предел текучести, Мпа, $\sigma_{0,2}$ | Относительное удлинение, %, δ_5 | Относительное сужение, %, ψ | Ударная вязкость, (кгс·м/см ²), K_c |
|--|---------------------------------------|--|----------------------------------|---|
| ≥ 960 | ≥ 590 | ≥ 19 | ≥ 30 | ≥ 5 |

При разливке первой заготовки использовали промковш без фильтра, а вторая заготовка разливалась через аналогичный промковш, но перед разливочным стаканчиком был установлен двухслойный пенокерамический фильтр (ПКФ) пористостью 5/10 ррi специальной конструкции [20] из диоксида циркония. Внешний вид разливочного устройства показан на рис. 1.

Для проведения металлографических исследований из подприбыльной части каждой из литых заготовок отбирались поперечные темплеты. Микроструктура образцов от слитков исследована с помощью оптического микроскопа НЕОРНОТ 32. Образцы для металлографического анализа подготовлены путем шлифования и полирования. Травление образцов проводилось электролитически в 10%-ом водном растворе щавелевой кислоты при величине анодного тока 5А, время травления для выявления микроструктуры составляло 2 с, для анализа макроструктуры – 4 с.

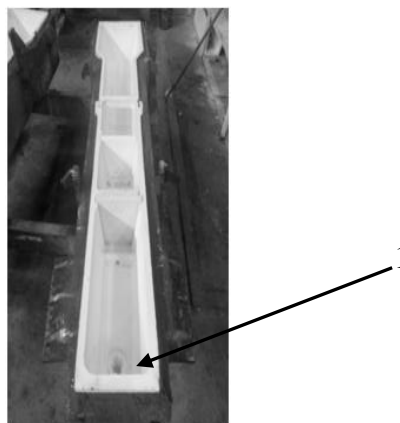
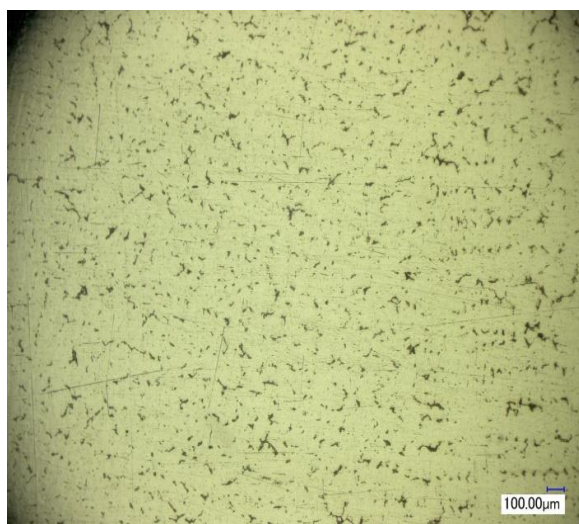


Рисунок 1. Внешний вид разливочного устройства:
1 – двухслойный фильтр.

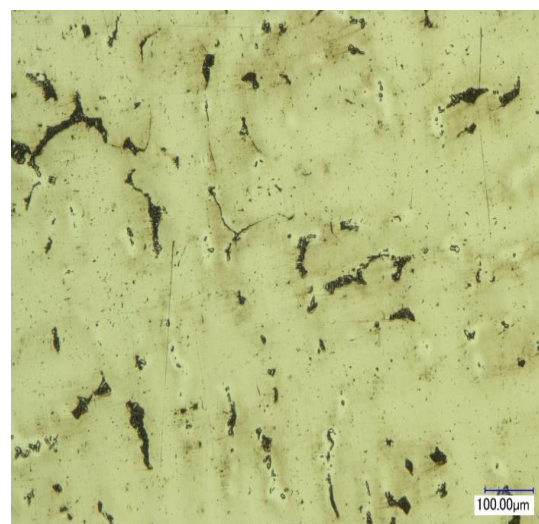
Контроль механических свойств проводили в соответствии с ГОСТ 1497-84 и ГОСТ 9454 -78 от пробы, полученной от темплета, вырезанной из подприбыльной части литой заготовки. Для этого от полученных темплетов на абразивно-отрезном станке вырезали образцы размерами 25x25x120 мм. Черновую мехобработку проводили на токарно-винторезном станке типа Б16Д25, термическую обработку выполняли в термической печи СНОЛ 7,2/1300.

3. Обсуждение результатов.

Микроструктуры образцов, полученных по двум вариантам технологии, представлены на рисунке 2:



а



б

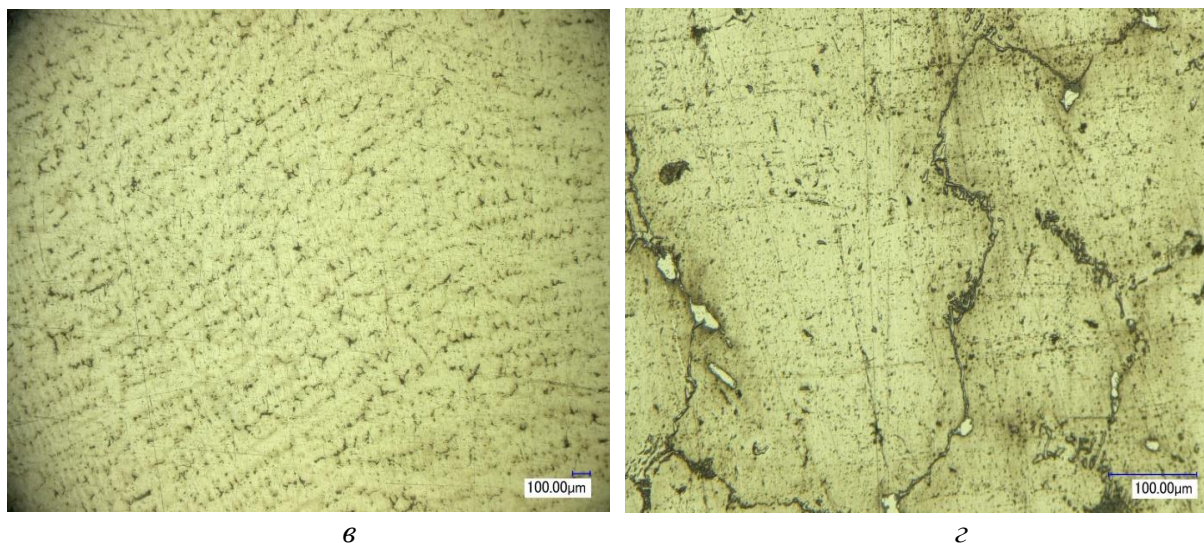


Рисунок 2. Микроструктура полученных заготовок *а, б* – без применения технологии фильтрации, увеличение 100х и 500х соответственно; *в, г* – с применением технологии фильтрации, увеличение 100х и 500х соответственно.

Как видно из рис. 2, *а* и 2, *б*, в микроструктуре сплава ВЖ-159, подвергнутого фильтрации, распределение структурных элементов по объему стало более равномерным, а сами они более мелкими. А на микроструктуре заготовки, не подвергнутой фильтрации видны неметаллические оксидные включения, имеющие характерный белый цвет на фотографиях микрошлифа. Кроме того, имеются хаотично расположенные структурные элементы сплава.

Несомненно, прямое влияние на механические свойства металла оказывает микроструктура. Механические свойства обеих заготовок показаны в таблице 2:

Таблица 2. – Механические свойства сплава ВЖ-159

| № заготовки | Временное сопротивление, МПа, σ_B | Предел текучести, Мпа, $\sigma_{0,2}$ | Относительное удлинение, %, δ_5 | Относительное сужение, %, ψ | Ударная вязкость, (кгс·м/см ²), K_c |
|-------------|--|---------------------------------------|--|----------------------------------|---|
| 1 – без ПКФ | 1094 | 690 | 31 | 36 | 7,6 |
| 2 – с ПКФ | 1138 | 726 | 36 | 46 | 9,0 |

Как видно из табл. 2, при применении ПКФ наблюдается рост служебных характеристик полученных заготовок на уровень от 4 до 15%.

4. Выводы

1. Показано, что микроструктура слитка сплава ВЖ-159, разлитого без применения технологии фильтрации, имеет в своем составе неметаллические оксидные включения, имеющие характерный белый цвет на фотографиях микрошлифа.

2. Получено почти полное удаление неметаллических включений в фильтрованном металле, по сравнению с не фильтрованным металлом.

2. Установлено, что применение технологии фильтрации на сплаве ВЖ-159 позволяет повысить комплекс механических свойств заготовки на уровень от 4 до 15%.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тен, Э. Б. Фильтрование металла в литейной форме (сборник материалов по фильтрам, эффективности применения, опыту использования в отечественной и зарубежной практике) / Э.Б Тен. - М., 2005. – 220 с.

2. Каблов, Е. Н. Литые лопатки газотурбинных двигателей / Е. Н. Каблов. – М.: МИСиС, 2001. – 632 с.

3. Сидоров, В. В. Высокоэффективные технологии и современное оборудование для производства шихтовых заготовок из литейных жаропрочных сплавов / В. В. Сидоров, В. Е. Ригин, А. В. Горюнов, Д. Е. Каблов // *Металлург*. – 2012. – №5. – С. 26-30.

4. Brotbey, A. V. Sources of trace elements in primary raw materials used in production of superalloys / A. V. Brotbey, R. H. Parker // *Metal Techn.* – 1984. – Vol. 1. – №10. – P. 419-427.

5. Каблов, Е. Н. Современные технологии получения прутковых заготовок из литейных жаропрочных сплавов нового поколения / Е. Н. Каблов, В. В. Сидоров, В. Е. Ригин, А. В. Горюнов // *Авиационные материалы и технологии*. – 2012. – № S. – С. 97-105.

6. Каблов, Е. Н. Никелевые литейные жаропрочные сплавы нового поколения / Е. Н. Каблов, Н. В. Петрушин, И. Л. Светлов, И. М. Демонис // *Авиационные материалы и технологии*. – 2012. – № S. – С. 36-51.

7. Каблов, Е. Н. Влияние примеси азота на структуру монокристаллов жаропрочного никелевого сплава ЖС-30-ВИ и разработка эффективных способов его рафинирования / Е. Н. Каблов, В. В. Сидоров, П. Г. Мин // *Авиационные материалы и технологии*. – 2012. – №2. – С. 32-36.

8. Каблов, Е. Н. Особенности технологии выплавки и разливки современных литейных высокожаропрочных никелевых сплавов / Е. Н. Каблов, О. Г. Оспенникова, В. В. Сидоров, В. Е. Ригин, Д. Е. Каблов // *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». Спец. вып. «Перспективные конструкционные материалы и технологии»*. – 2011. – С. 68-78.

9. Каблов, Д. Е. Исследование влияния азота на структуру и свойства монокристаллов из литейного жаропрочного сплава ЖС-30-ВИ / Д. Е. Каблов, Е. Б. Чабина, Сидоров, П. Г. Мин // *МиТОМ*. – 2013. – №8. – С. 3-7.

10. M. Bartosinski, John H. Magee, B. Friedrich. Improving the chemical homogeneity of austenitic and martensitic stainless steels during nitrogen alloying in the pressure electro slag remelting (PESR) process. [Электронный ресурс] – http://www.metallurgie.rwthachen.de/old/images/pages/publikationen/aertosinskimae_id_4297.

11. Демченко, А. И. Влияние фильтрации расплава на структуру сплава ЭП-718 / А. И. Демченко, В. А. Коровин, И. О. Леушин // *Металлургия машиностроения*. – 2019. – №5. – С. 12-16.

12. Демченко, А. И. Разливка жаропрочных никелевых сплавов в вакуумно-индукционной печи с применением пенокерамических фильтров / Сборник тезисов X конференции молодых специалистов «Перспективы развития металлургических технологий» // ГНЦ ФГУП «ЦНИИчермет им. И. П. Бардина» 27 февраля 2019г. – С. 27-31.

13. Демченко, А. И. Разливка жаропрочных никелевых сплавов в вакуумно-индукционной печи с применением пенокерамических фильтров / Демченко А. И., Шевяков В. Ф., Корзун Е. Л., Коровин В. А., Леушин И. О // Сборник трудов XV международного конгресса сталеплавателей. / Москва-Тула, 15-19 октября 2018г. – С.220-224.
14. Демченко, А. И. Повышение качества никелевого сплава фильтрацией через ПКФ / А. И Демченко, В. А. Коровин, И. О. Леушин // Литейщик России. – 2019. – №6. – С. 29-33.
15. Демченко, А. И. Влияние фильтрации на структуру и свойства жаропрочного сплава ЭП-648-ВИ / А. И Демченко, В. А. Коровин, И. О. Леушин // Технология Металлов. – 2019. – №9. – С 2-5.
16. Сидоров, В.В. Оценка эффективности фильтрации при разливке сложнолегированного никелевого расплава / В. В. Сидоров, И. В. Исходжанова, В. Е. Ригин, Ю. И. Фоломейкин // Электротехнология. – 2011. – №11.
17. Металлургия литейных жаропрочных сплавов: технология и оборудование / В. В. Сидоров, Д. Е. Каблов, В. Е. Ригин: под общ. ред. Е.Н. Каблова. – М.: ВИАМ, 2016. – 368 с.
18. Сидоров, В. В. Прогрессивные металлургические процессы получения шихтовых заготовок из литейных жаропрочных сплавов / В. В. Сидоров // Авиационные материалы. Избранные труды «ВИАМ» 1932-2002: юбилейный науч.-технич. сб. // под общ. ред. Е. Н. Каблова. – М.: МИСИС-ВИАМ, 2002. – С. 156-160.
19. Демченко, А. И. Рафинирование никелевых сплавов с применением пенокерамических фильтров / А. И. Демченко, В. Ф. Шевяков, В. А. Коровин, С. В. Беляев, В. Н. Гуцин, И. О. Леушин. // Заготовительные производства в машиностроении – 2020. – Т. 18. – №6. – С. 243-246.
20. Пат. 2739897 РФ, МПК В22 С 9/08, В22 D 11/119. Двухслойный пористый пенокерамический фильтр для перегородки промежуточного ковша машины непрерывного литья металла / Демченко А. И., Коровин В. А., Кучменко А. А.; заявитель и патентообладатель ПАО «Русполимет» (RU). – № 2020115198; заявл. 16.14.2020; опубл. 29.12.2020.

Поступила в редколлегию 04.02.2023 г.

УДК.621.01

А. М. Лахин, канд. тех. наук, доцент

Донецкий национальный технический университет, Донецк, Россия

Тел: +7 949 3189801; E-mail: l Relax@mail.ru

ПОВЫШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ИЗДЕЛИЙ С ЗУБЧАТЫМ ВЕНЦОМ

В работе рассмотрены и исследованы эксплуатационные особенности работы деталей зубчатых передач и предложены варианты повышения эксплуатационных характеристик за счет обеспечения функционально-ориентированных свойств рабочих поверхностей зубьев.

Ключевые слова: зубчатое колесо, технология, качество, функционально-ориентированный подход

A. M. Lakhin

INCREASING THE PERFORMANCE PROPERTIES OF PRODUCTS WITH GEAR

The paper considers and investigates the operational features of the operation of gear parts and suggests options for improving operational characteristics by providing functionally oriented properties of the working surfaces of the teeth.

Keywords: gear wheel, technology, quality, function-oriented approach

1. Введение.

В настоящее время зубчатые передачи получили наиболее широкое применение среди всех видов силовых передач. Такие передачи, благодаря их конструктивному многообразию, способны передавать крутящие моменты между деталями с параллельными, пересекающимися, скрещивающимися осями, преобразовывать вращательное в поступательное движение или наоборот, использоваться для передачи жидкостей, изменения скоростей и направлений движения. Это обусловлено их неоспоримыми преимуществами, такими как: высокая нагрузочная способность, широкие диапазоны передаваемых скоростей и крутящих моментов, постоянство передаточного отношения, высокий КПД, малые габариты передачи, высокая надежность в работе и другие.

Между тем, для обеспечения всех преимуществ зубчатых передач требуются высокие трудозатраты, связанные с изготовлением зубчатых колес, также зачастую требует применения дорогостоящих конструкционных материалов и термической обработки зубчатых колес. Также зубчатые передачи требуют высокого качества и чистоты смазочного материала, особенно для высокоскоростных зубчатых колес. Кроме того, с увеличением окружных скоростей повышаются требования к степени точности зубчатых колес, охватывающие ряд параметров зубьев, которые должны быть выполнены с более высокой точностью.

В последнее время с развитием аддитивных технологий и технологий нанесения износостойких покрытий получил развитие новый подход в обеспечении эксплуатационных свойств изделий, связанный с обеспечением требуемых свойств не всей детали, а только ее части, выполняющей непосредственные функции, связанные со служебным назначением данной детали. Этот подход, кроме обеспечения требуемых физико-механических свойств участков и зон рабочих элементов, также направлен на изменение конструктивных особенностей элементов изделия для более полной адаптации к условиям его эксплуатации. Функционально-ориентированные технологии, разработанные проф. Михайловым А. Н. [1] определяют теоретические основы реализации данного подхода для различных изделий машиностроения, и представляют собой но-

вый вид технологий в которых свойства элементов изделия обеспечиваются в соответствии с условиями их эксплуатации в машине или технологической системе, а технологические воздействия определяются параметрами требуемых свойств изделия.

На основании вышесказанного целью данной работы является повышение эксплуатационных характеристик зубчатых колес на базе обеспечения функционально-ориентированных свойств рабочих элементов зубьев.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- выполнить анализ особенностей работы зубьев зубчатых колес и причин износа рабочих поверхностей зубьев;
- выполнить анализ элементов зубчатых колес эксплуатационным признакам;
- исследовать варианты схем технологического воздействия для обеспечения заданных эксплуатационных свойств рабочих поверхностей зубьев;
- предложить технологические методы реализации данных схем технологического воздействия.

2. Основное содержание и результаты работы.

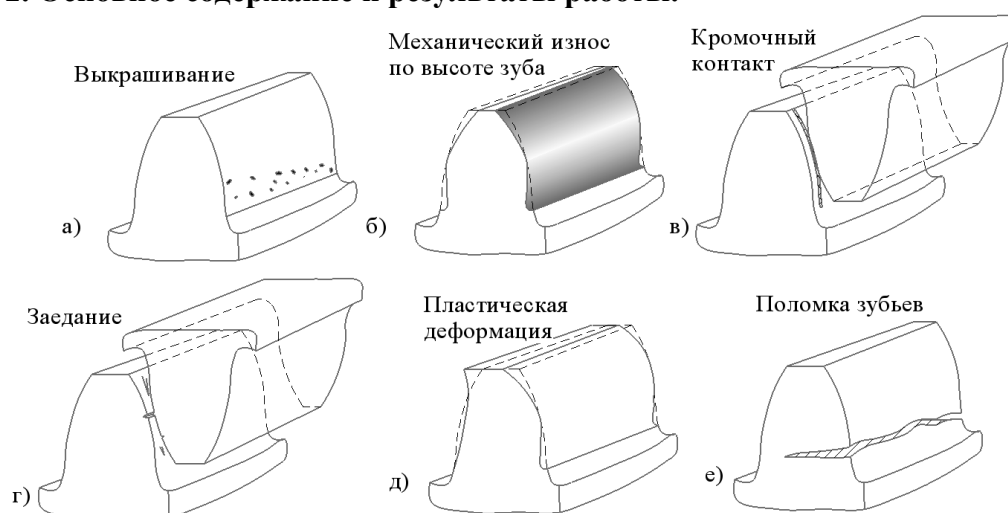


Рисунок 1. Основные виды повреждения зубьев при эксплуатации зубчатых передач

При эксплуатации зубчатых передач встречаются следующие повреждения и выхода из строя зубчатых колес (рис.1).

Выкрашивание зубьев (рис.1, а), которое возникает вследствие контактных напряжений в зацеплении и проявляется как правило, в начальный период приработки зубьев (микровыкрашивание), а также после продолжительной эксплуатации высоконагруженных зубчатых колес. Данный вид износа зависит от состояния поверхностного слоя, а также правильности геометрической формы рабочей поверхности зуба.

Механический или абразивный износ зубьев (рис.1, б) возникает после длительной эксплуатации зубчатой передачи, и вызван, при достаточной чистоте смазочного материала, разностью скоростей взаимного скольжения профилей в зацеплении [2]. Характер данного износа неравномерен по высоте зуба, он уменьшается ближе к полюсной линии и увеличивается в зонах у головки и ножки зуба. Неравномерность данного износа нарушает правильность зацепления, увеличивает тангенциальный зазор и является причиной возникновения шума при работе зубчатой передачи.

Кромочный контакт (рис.1, в) появляется в результате погрешностей направления зуба, монтажных погрешностей, а также вследствие разности ширин зубчатых венцов у шестерни и колеса из-за чего наибольшие контактные напряжения распределяются у краев зуба более узкого зубчатого венца. Кромочный контакт вызывает появление впадин и забоин на поверхностях зубьев, ухудшает качество рабочих поверхностей и в дальнейшем приводит к выкрашиванию и образованию усталостных трещин на поверхностях зубьев.

Заедание зубьев (рис.1, в) возникает вследствие схватывания и адгезии частиц выкрашиваемого материала зубьев на одном из колес, и образования лунок на зубьях другого колеса. Это приводит к сопротивлению при перекачивании профилей зубьев из-за попадания налипшего материала в лунки сопряженного зуба. Из-за этого значительно снижается КПД зубчатой передачи и увеличивается последующий износ зубьев вследствие наличия концентраторов напряжений.

Пластическая деформация зубьев (рис.1,г) возникает по причине превышения изгибных напряжений у ножки зуба и чаще всего появляется из-за превышения номинальных нагрузок или недостаточной степени упрочнения основания зуба. В дальнейшем деформация зубьев изменяет формы впадин и может стать причиной поломки зубьев.

Поломка зубьев (рис.1, д) происходит чаще всего вследствие развития усталостных трещин у основания зуба и носит усталостный характер. Проявляется главным образом при ударных знакопеременных нагрузках и в большей степени характерно для прямозубых зубчатых колес.

Рассмотрим структуру изделия с зубчатым венцом, на примере зубчатого блока (рис. 2).

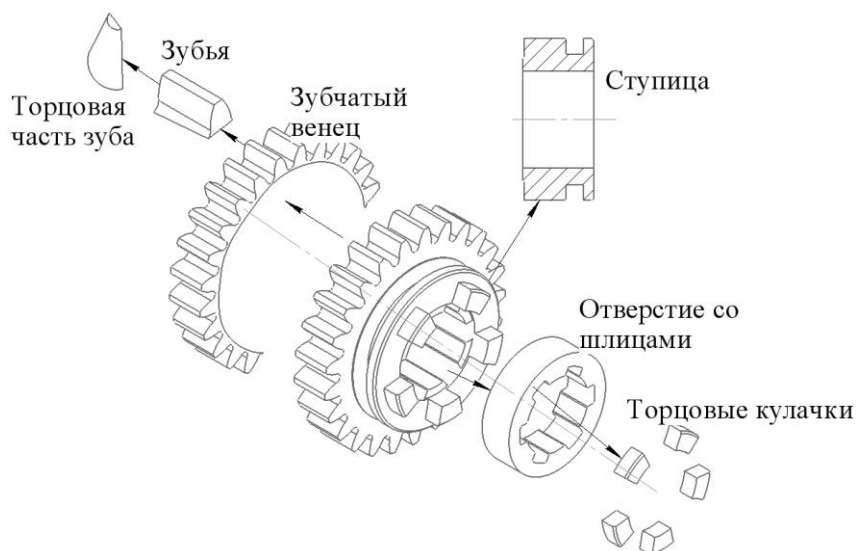


Рисунок 2. Структура изделия (зубчатый блок)

Ранее установлено [3], что любая деталь может быть представлена совокупностью исполнительных (рабочих и базирующих), связующих, дополнительных и вспомогательных элементов. Изделие с зубчатым венцом, помимо функции по передаче крутящего момента посредством зацепления зубьев, может выполнять ряд дополнительных функций, определяемых его служебным назначением.

Согласно классификации, связующими элементами является ступица зубчатого блока, объединяющая на себе все элементы детали. Исполнительные базирующими элементами являются шлицевое отверстие с наружным или внутренним диаметром (в зависимости от способа центрирования) и боковыми стенками шлицев; а также торцы детали, определяющие положение зубчатого блока в осевом направлении.

Вспомогательными элементами являются фаски на поверхностях, паз на ступице для вхождения вилки переключения скоростей, а также закругленные части на торцовых поверхностях зубьев. Они служат для предотвращения заклинивания и облегчения вхождения в зацепление при переключении скоростей.

Рабочими исполнительными элементами являются зубчатый венец с отдельными зубьями, выполняющий передачу крутящего момента посредством вхождения в зацепление зубьев; торцовые кулачки выполняющие передачу момента посредством вхождения в зацепление с соосной деталью; и шлицевое отверстие, посредством которого выполняется осевое перемещение зубчатого блока при переключении.

Приведем требования к наиболее ответственным группам элементов (табл.1.).

Таблица 1. - Требования к основным группам элементов детали зубчатый блок

| Элементы | | Требования |
|-----------------|---------------------------|---|
| Базирующие | Торцы | Размерная точность |
| | | Точность ориентации |
| | Отверстие | Размерная точность |
| | | Точность формы и взаимного расположения |
| | Боковые стенки шлицев | Точность размеров |
| | | Контактная выносливость |
| Рабочие | Зубья | Контактная прочность |
| | | Изгибная прочность |
| | | Способность воспринимать динамические нагрузки |
| | | Низкий коэффициент трения |
| | | Стойкость к неравномерному износу |
| | | Не склонность к адгезионному схватыванию |
| | Шлицы | Прочность среза |
| | | Прочность смятия |
| | | Низкий коэффициент трения |
| | Торцовые кулачки | Изгибная прочность |
| | | Прочность среза |
| | | Способность входить в зацепление без заклинивания |
| Вспомогательные | Закругленные торцы зубьев | Износостойкость |
| | | Способность входить в зацепление без заклинивания |
| | | Низкий коэффициент трения |

Рассмотрим основные способы обеспечения свойств элементов зубчатого венца (рис. 3).

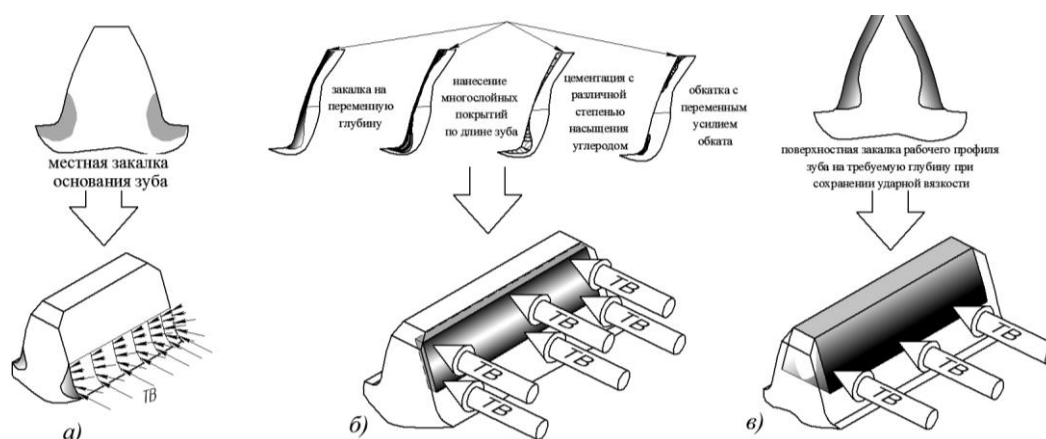


Рисунок 3. Технологические схемы обеспечения эксплуатационных свойств для предупреждения следующих видов разрушения: а) поломки зубьев; б) неравномерного механического износа по рабочей поверхности; в) усталостного выкрашивания.

Поскольку пластическая деформация зубьев и их поломка возникает чаще всего по причине длительного действия знакопеременных окружных сил в зонах у головки зуба излом происходит в зоне у основания зуба. Наиболее характерен данный вид износа для колес с малым числом зубьев, у ножки которых при нарезании образовалось сужение. Для избегания поломки зуба, объемным зонам у основания зуба необходимо обеспечивать более высокую прочность изгиба, причем данные свойства должны изменяться по объемному участку зуба и иметь наибольшую прочность у наружной поверхности. Это можно обеспечить за счет использования местной закалки, в частности закалки ТВЧ со специальным сердечником, выполненным по форме впадины зуба, с плавной регулировкой температуры нагрева и интенсивности охлаждения (рис.3, а).

Повреждения вследствие механического износа (рис.3, б) а также неравномерность износа зубьев вызваны взаимным скольжением профилей зубьев [2]. Вследствие изменения касательной составляющей скорости в зацеплении при перекатывании зубьев возникает трение с различной интенсивностью, которое при однородных свойствах материала зубчатого колеса, вызывает повышенный износ на участках у головки и ножки зуба. При этом в полюсе зацепления он минимален. Основной технологической задачей при этом является обеспечение свойств участков поверхностного слоя зуба в зависимости скорости взаимного скольжения в точке контакта, что может быть достигнуто при изменении свойств сопрягаемых поверхностей в соответствии со скоростью взаимного скольжения [4]. Возможным вариантом является плавное уменьшение коэффициента трения и увеличении стойкости к механическому износу в соответствии с графиком скорости взаимного скольжения профилей. Это можно достичь следующими вариантами технологических воздействий на рабочие поверхности зубьев:

- термической обработкой на переменную глубину по высоте зуба за счет изменения скорости прогрева и охлаждения в отдельных участках профиля зуба;
- обкаткой рабочих поверхностей зубьев с различным усилием обката, таким образом обеспечивая различную степень наклепа по зонам зубьев;
- нанесением многослойных покрытий с постепенным уменьшением количества слоев от головки и ножки к полюсной линии зуба;
- химико-термической обработкой с различной интенсивностью насыщения поверхностного слоя упрочняющими элементами по зонам рабочего профиля зуба.

Выкрашивание материала с поверхности зубьев (рис. 3, в) обусловлено действием контактных напряжений при взаимодействии пары зубьев. Для устранения данного вида разрушения технологические воздействия должны быть направлены на повышение контактной прочности зубьев в зонах у ножки и полюсной линии с дальнейшей отделочной механической обработкой для достижения заданного параметра шероховатости.

Выбор конкретного способа отделочной и упрочняющей обработки элементов зубчатого венца должен быть обоснован конкретными условиями эксплуатации, включающими величину рабочих нагрузок, окружные скорости в зацеплении, конструктивные особенности зубчатой передачи, допускаемые температуры, условия смазки и другие особенности.

3. Заключение

Таким образом, в работе на основе исследования основных причин разрушения и выхода из строя зубчатых колес, определены технологические способы повышения эксплуатационных свойств зубчатых колес на основе обеспечения функционально-ориентированных свойств рабочих поверхностей зубьев. Для повышения ресурса износостойкости элементов зубчатых колес необходимо выполнять технологические воздействия на зоны и участки зубьев, испытывающие наибольшие эксплуатационные нагрузки. Для этого в работе предложены способы, направленные на: предотвращение неравномерного механического износа по высоте зуба; на исключение поломки зубьев вследствие пластической деформации и динамических нагрузок на зуб; а также на уменьшение или устранение усталостного выкрашивания с рабочих поверхностей зубьев.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Михайлов, А. Н. Основы синтеза функционально-ориентированных технологий машиностроения / А. Н. Михайлов, А. Н. Михайлов. – Донецк: Технополис, 2009. – 346 с. – ISBN 9667907244.
2. Кудрявцев, В. Н. Зубчатые передачи. – М.: «Машгис», 1957. – 263 с.
3. Лахин, А. М., Особенности внедрения функционально-ориентированного подхода при изготовлении зубчатых колес / А. М. Лахин, А. Н. Михайлов // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научных трудов. – Донецк: ДонНТУ, 2018. – Вып. 1 (60). – С. 50 - 55.
4. Лахин, А. М. Повышение ресурса зубчатых передач на основе нанесения функционально - ориентированных покрытий / А. М. Лахин // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научных трудов. – Донецк: ДонНТУ, 2021. – Вып. 4 (75). – С. 35 - 41.
5. Лахин, А. М. Повышение качества зубчатых колес с функционально-ориентированными покрытиями / Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности: сборник трудов XIX межд. научно-технической конференции «Чтения памяти В. Р. Кубачека» Екатеринбург, 20 – 21 мая 2021 г. Екатеринбург: Уральский государственный горный университет, 2021. – С. 326-329.

Поступила в редколлегию 25.01.23 г.

УДК 621.01

А. Н. Михайлов¹, д-р техн. наук, проф., **А. В. Анастасьев**¹, аспирант,
Н. С. Пичко², д-р филол. наук, проф.

¹ Донецкий национальный технический университет,

² Филиал Ухтинского государственного технического университета в г. Усинск

Тел. / Факс: +79493497428; E-mail: anastasyev.av@yandex.ru

МЕТОДИКА СИНТЕЗА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПОВЫШЕНИЯ РЕСУРСА ОТДЕЛОЧНО-УПРОЧНЯЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ ЛОПАТОК ТУРБИНЫ ГТД

В данной статье, на основе анализа конструктивных особенностей и механизмов разрушения лопаток турбин ГТД определены ключевые факторы, которые применены в качестве граничных условий в разработанной методике синтеза технологического обеспечения отделочно-упрочняющей обработки лопаток турбины и выбора рациональных вариантов. Выбранные граничные условия, характеризующие процесс синтеза технологического обеспечения отделочно-упрочняющей обработки, разделены в группы, характеризующие: деталь (заготовку) и её физико-механические свойства; режимы обработки, такие как скорость резания или усилие прижима; инструмент. Составлена матрица множества факторов, влияющих на процесс синтеза технологического обеспечения, и граф множества. Применение к последнему алгоритма Дейкстры позволит определить рациональный метод синтеза.

Ключевые слова: лопатка, турбина, ГТД, синтез, воздействия, процесс

A. N. Mikhaylov, A. V. Anastasyev, N. S. Pichko

METHOD OF SYNTHESIS OF TECHNOLOGICAL SUPPORT OF INCREASING THE RESOURCE OF FINISHING AND HARDENING TREATMENT OF GTE TURBINE BLADES

In this article, on the basis of an analysis of the design features and mechanisms of destruction of turbine blades of gas turbine engines, key factors are determined that are used as boundary conditions in the developed methodology for the synthesis of technological support for finishing and hardening treatment of turbine blades in order to increase their service life. The selected boundary conditions that characterize the process of synthesis of technological support for finishing and hardening treatment are divided into groups characterizing: a part (workpiece) and its physical and mechanical properties; machining conditions such as cutting speed or clamping force; tool. A matrix of many factors influencing the process of synthesis of technological support, and a graph of the set are compiled. Applying Dijkstra's algorithm to the latter will allow us to determine a rational synthesis method.

Keywords: blade, turbine, gas turbine engine, synthesis, impact, process

1. Введение

Современный уровень производственных процессов требует всё более высокого выхода конечных продуктов. Конструкционные материалы, применяемые при экстремальных условиях эксплуатации должны быть работоспособными и надежными.

При обработке лопаток турбин (ЛТ) наиболее широко используются методы механической обработки и основанные на них комбинированные методы обработки. Благодаря современным высокоточным методам получения заготовок, например для лопаток статора турбины, заготовки изготавливают литые без припуска по перу, что сводит механическую обработку к обработке поверхностей хвостовиков [1].

Операции отделочно-упрочняющей обработки (ОУО), могут включать в себя: черновое и чистовое шлифование, полирование, глянецвание, ультразвуковое упрочнение шариками, дробеструйную обработку, нанесение покрытий различными методами, термическую обработку. Точный состав и количество операций определяется в зависи-

мости от типа и характеристик конкретной ЛТ, и выдвигаемых к ней эксплуатационных требований.

Целью данной работы является разработка методики синтеза технологического обеспечения ОУО лопаток турбины ГТД на основе комплексных методов обработки, для повышения их ресурса за счет решения вопросов функциональной ориентации технологических воздействий.

В соответствии с поставленной целью в работе определены следующие задачи: анализ конструктивных особенностей и механизмов разрушения лопаток турбин; определение ключевых факторов, которые можно использовать в качестве граничных условий при проведении синтеза технологического обеспечения; разработка методики синтеза технологического обеспечения ОУО ЛТ ГТД и выбора рациональных вариантов из генерируемого множества.

2. Основное содержание и результаты работы

Лопатки турбины ГТД работают при повышенных температурах в агрессивной среде, и подвергаются большим центробежным нагрузкам. Профильная часть и хвостовики лопаток кроме растяжения и изгиба от центробежных сил испытывают переменные напряжения от вибрационных и тепловых нагрузок [2]. Это характеризует их сложную пространственную геометрию, позволяющую им выполнять свою непосредственную функцию в условиях высоких температур, давления, воздействия механических и химических составляющих газового потока.

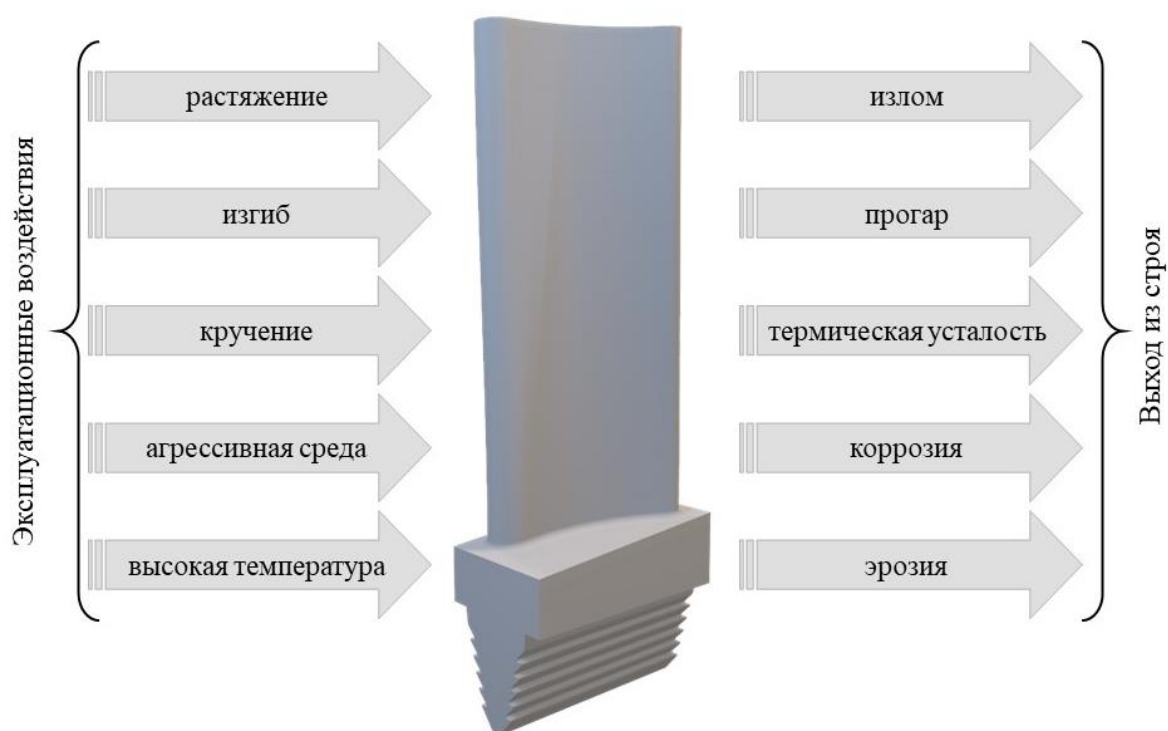


Рисунок 1. Основные эксплуатационные воздействия, приводящие к выводу из строя лопаток турбины ГТД

Лопатки турбин подвергаются следующим основным действующим эксплуатационным функциям, приводящим к разрушению – действию высокой температуры газового потока, статических и циклических нагрузок (рис. 1), а также действию процес-

сов газовой коррозии. Эти воздействия, по механизму их действия, можно структурировать в три основные группы: механические, химические и температурные [3]. Механические воздействия включают в себя напряжения растяжения и изгиба от центробежных сил, изгиб и кручение от газового потока, а также переменные напряжения от вибрационных нагрузок [4]. В зависимости от конструкции лопатки, в частности от расположения центра тяжести, центробежные силы, возникающие в работе ГТД могут вызывать как напряжения растяжения в поперечных сечениях лопатки, так и напряжения растяжения и изгиба [5]. Эксплуатационные воздействия химического характера включают в себя эрозию, коррозию, окисление, нагар. Температурные воздействия наиболее ярко характеризуются двумя видами повреждений: перегреву выше температуры старения, что приводит к изменению микроструктуры металла, а следовательно, к снижению характеристик прочности, а также к термической усталости, проявляющейся в появлении термонапряжений, вызванных многократным неравномерным изменением температуры между входной и выходной кромками лопатки и основным телом. Следует отметить неравномерное распределение температуры в теле лопатки [6] и соответствующие возникающие напряжения под действием эксплуатационных нагрузок.

Как следствие, под действием неравномерных эксплуатационных воздействий ЛТ ГТД подвергаются неравномерному износу, что в дальнейшем приводит к их досрочному выходу из строя. Проблеме неравномерности износа посвящен ряд работ [7, 8], в которых авторы предлагают повышать не ресурс всего изделия в целом, а основываясь на особенностях эксплуатации применять функционально-ориентированный подход, для повышения ресурса за счет адаптации их свойств к особенностям действия неравномерного износа рабочих поверхностей [8].

Лопатки турбин ГТД имеют широкую номенклатуру применяемых материалов, конструктивных исполнений и особенностей, как в пределах различных ступеней турбины одного двигателя, так и в целом, с учетом широкого спектра существующих ГТД. При этом, на процесс синтеза требуемого технологического обеспечения будут влиять такие факторы как: характеристики заготовки и детали, режимы резания, параметры режущего инструмента.

Учитывая приведенные факторы обобщенно и в частности, можно провести синтез множества вариантов технологического обеспечения отделочно-упрочняющей обработки лопаток турбины. При этом полученный результат будет зависеть от выбранных граничных условий.

Для решения данной задачи применим метод морфологического анализа [9, 10], позволяющий охватить все возможные варианты технических решений.

Для этого необходимо учесть все возможные факторы, влияющие на результаты процесса ОУО.

Проведенный анализ конструктивных особенностей и эксплуатационных функций позволяет выделить следующие граничные условия, характеризующие деталь и заготовку:

- варианты материала лопатки;
- варианты защитных покрытий;
- варианты возможного исходного состояния лопатки;
- варианты возможных параметров неравномерности эксплуатационных воздействий;

- варианты групп шероховатости поверхности после ОУО.

Группа граничных условий, характеризующих режимы резания включает в себя:

- возможные варианты скорости резания;

- варианты возможной величины снимаемого припуска;
- варианты величины прижима при полировании.

Характеристики инструмента и применяемых полировальных паст образуют третью группу граничных условий, включающих:

- варианты используемых полировальных материалов;
- варианты технологических средств для реализации процессов полирования;
- варианты параметров соотношения элементов технологических средств полирования.

Тогда процесс синтеза технологического обеспечения с целью повышения ресурса лопаток турбины ГТД можно выразить в виде множества факторов, при этом каждый элемент множества состоит из подмножеств:

$$M = \{A, B, C, D, E, F, G, H, K, U, V\}, \quad (1)$$

где A – факторы, учитывающие варианты материала лопатки;
 B – факторы, учитывающие варианты защитных покрытий;
 C – факторы, учитывающие состояние заготовки до процесса обработки;
 D – факторы, учитывающие варианты возможных параметров неравномерности эксплуатационных воздействий;

E – факторы, учитывающие варианты групп шероховатости поверхности после ОУО;

F – факторы, учитывающие возможные варианты скорости резания;

G – факторы, учитывающие варианты возможной величины снимаемого припуска;

H – факторы, учитывающие варианты величины прижима при полировании;

K – факторы, учитывающие варианты используемых полировальных материалов;

U – факторы, учитывающие варианты технологических средств для реализации процессов полирования;

V – факторы, учитывающие варианты параметров соотношения элементов технологических средств полирования.

При этом каждый элемент множества (1) состоит из подмножества элементов, так, подмножество факторов, учитывающих варианты материала лопатки имеет вид:

$$A = \{A_1, A_2 \dots A_{i-1}, A_i\}, \quad (2)$$

где A_1, A_2, A_i – возможные варианты используемых материалов ЛТ ГТД.

Аналогичными подмножествами можно представить все факторы, учитываемые в множестве (1). Таким образом, получим множество подмножеств фактором, учитывающих варианты нанесенных защитных покрытий, состояние заготовки до процесса обработки, параметры неравномерности эксплуатационных воздействий, группы шероховатости поверхности, варианты возможной скорости резания и величины снимаемого припуска, используемых материалов и технологических средств для реализации процессов полирования.

Рассмотренные подмножества, влияющие на процесс синтеза технологического обеспечения, представим в виде морфологической матрицы:

$$M = \begin{pmatrix} A_1, A_2 \dots A_{i-1}, A_i \\ B_1, B_2 \dots B_{j-1}, B_j \\ C_1, C_2 \dots C_{n-1}, C_n \\ D_1, D_2 \dots D_{m-1}, D_m \\ E_1, E_2 \dots E_{l-1}, E_l \\ F_1, F_2 \dots F_{o-1}, F_o \\ G_1, G_2 \dots G_{p-1}, G_p \\ H_1, H_2 \dots H_{q-1}, H_q \\ K_1, K_2 \dots K_{r-1}, K_r \\ U_1, U_2 \dots U_{s-1}, U_s \\ V_1, V_2 \dots V_{w-1}, V_w \end{pmatrix} \quad (3)$$

Графически это множество факторов можно выразить с помощью теории графов [11]. Полученный граф приведен на рис. 2.

Для матрицы (3) полное число генерируемых вариантов технологического оснащения (ТО) ОУО N можно определить как произведение вариантов каждой строки факторов

$$N = i \cdot j \cdot n \cdot m \cdot l \cdot o \cdot p \cdot q \cdot r \cdot s \cdot w. \quad (4)$$

Следующим шагом является уточнение количества вариантов в каждом факторе, от чего будет зависеть количество генерируемых вариантов ТО ОУО.

В настоящее время при производстве ЛТ ГТД применяется множество различных материалов, поэтому выбор будет напрямую зависеть от рассматриваемого двигателя. Так, для двигателя ТВЗ-117 и его производной ВК-2500 характерны лопатки из следующих материалов: титан ВТ12, титан ВТ14, титан ВТ22 и титановый сплав ВТ8М-1.

Факторы, учитывающие варианты защитных покрытий, укрупненно можно разделить на следующие группы: с нанесенными одно или многослойными в т.ч. градиентными жаростойкими покрытиями; с защитными износостойкими покрытиями и без защитных покрытий.

Факторы, учитывающие состояние заготовки до процесса обработки можно разделить на 2 группы, характеризующие исходную заготовку как новую (с равномерным распределением припуска), или восстанавливаемую, характеризующуюся неравномерным распределением припуска.

В зависимости от конструкции, ступени и т.д. ЛТ ГТД подвергаются различным эксплуатационным воздействиям, так, лопатки первой ступени подвергаются значительным температурным воздействиям, с перепадами температур по профилю пера лопатки 200°C и выше, и существенному абразивному воздействию по входной кромке [3], факторы неравномерности воздействия разделяем на 3 вида: с минимальной, умеренной и высокой неравномерностью эксплуатационных воздействий.

Факторы, учитывающие варианты групп шероховатости поверхности после ОУО включают в себя значения шероховатости $Ra - 0,32, 0,63, 1,25$ [12].

Так, возможные варианты скорости резания при полировании будут равны: 10 м/с; 30 м/с и 50 м/с.

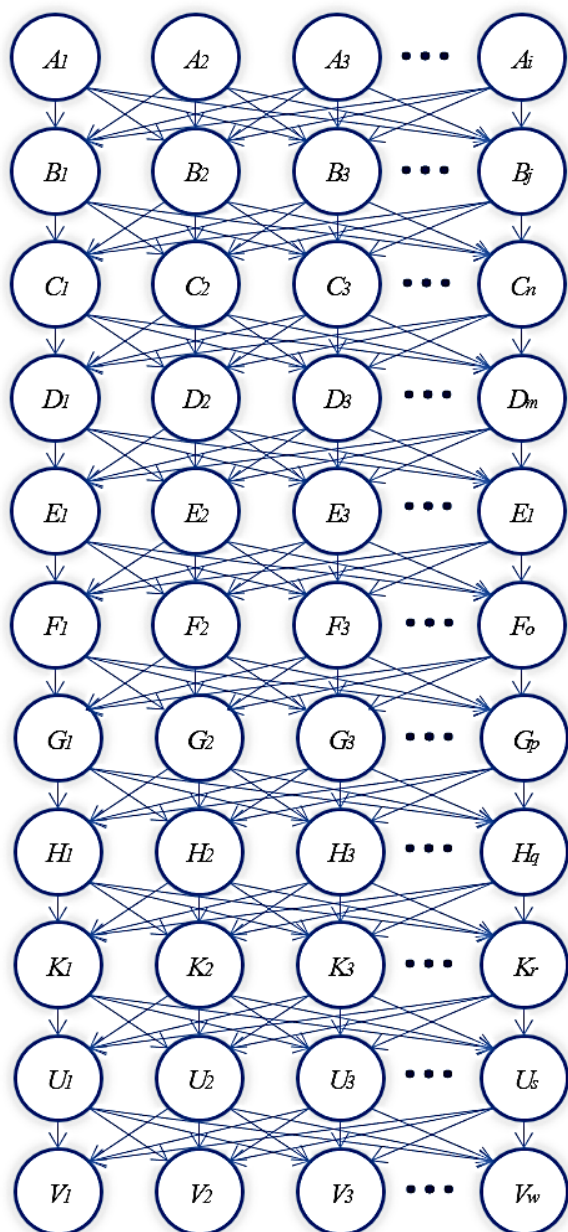


Рисунок 2. Граф процесса синтеза технологического обеспечения

Для дальнейшего анализа такое огромное количество вариантов является избыточным, и выбрать искомый вариант затруднительно. С учетом того, что процесс синтеза технологического оснащения ОУО производится под конкретные варианты ЛТ ГТД, значения группы факторов, характеризующих деталь и заготовку будут известны, тем самым количество факторов *A, B, C, D, E* будет равно 1, а количество возможных вариантов технологических средств для полирования уменьшится с 9 до 6. Подставив полученные значения факторов в уравнение (4), получим:

$$N = 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 3 \cdot 3 \cdot 3 \cdot 3 \cdot 6 \cdot 3 = 1458 \text{ (вариантов)}$$

Величина снимаемого припуска при изготовлении новых лопаток может составлять до 0,07 мм, в то время как при восстановлении может достигать до 0,3 мм. Для уменьшения количества генерируемых вариантов ограничиваемся тремя значениями данного фактора – до 0,07 мм, до 0,2 мм и свыше.

Величина прижима при полировании может варьироваться в диапазоне до 100 Н, что будет целесообразно разделить на 3 возможных варианта – 10 Н, 50 Н и 100Н.

Существующие материалы, используемые при полировании, можно разделить на 3 группы:

1. Фетровые и войлочные круги;
2. Круги из различных тканей и прессованной бумаги;
3. Круги из резины или других эластичных материалов.

При полировании используется широкий спектр технологических средств полирования, включающих естественные (крокус, мел, венская известь, тальк, диатомит, трепел) и искусственные (окиси железа FeO, хрома CrO, алюминия Al₂O₃).

Наиболее распространенными соотношениями элементов технологических средств полирования являются следующие: 1:1, 1:3 и 1:5 [13].

Подставив выбранные значения факторов в уравнение (4), получим:

$$N = 4 \cdot 3 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 3 \cdot 3 \cdot 3 \cdot 3 \cdot 9 \cdot 3 = 472392 \text{ (вариантов)}$$

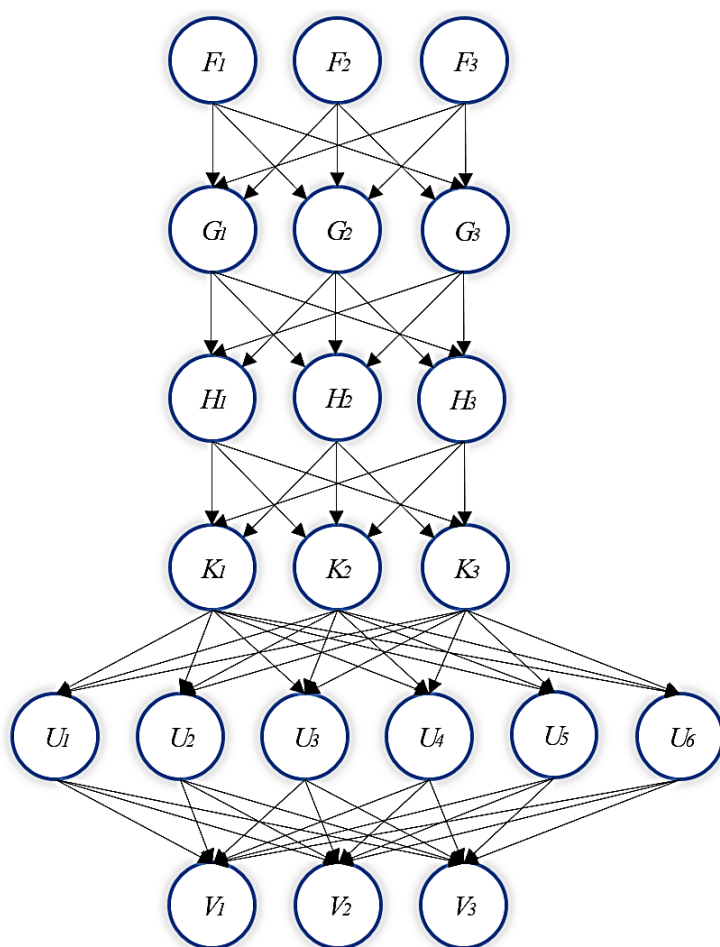


Рисунок 3. Уточненный граф процесса синтеза технологического обеспечения

Так, назначаем вес элементов следующим образом. Влияние факторов, учитывающих скорость резания, распределяем следующим образом – максимальный вес 100 принимаем при минимальной скорости резания 10 м/с, значение веса 50 – при скорости резания 30 м/с, и 10 при максимальной – 50 м/с.

Аналогично, задаем вес факторов, учитывающих величину снимаемого припуска – от 20 для минимального припуска до 100 для максимального.

Влияние полировального материала, исходя из его свойств, учитываем соответствующим распределением веса: 30 для кругов из резины или других эластичных материалов; 80 для войлочных и фетровых кругов; 100 для тканевых кругов, и кругов из прессованной бумаги.

При полировании металлов и сплавов искусственные технологические средства показывают себя более эффективно, чем естественные. Соответственно вес этих элементов будет распределен следующим образом: 20 для окиси алюминия Al_2O_3 , 40 для окиси хрома CrO , 60 для окиси железа FeO ; 80 для трепела и диатомита и 100 для таких естественных материалов как крокус, мел, венская известь и тальк.

С учетом выбранных граничных условий, граф процесса синтеза (рис. 1) примет вид, представленный на рис. 2.

Применив к разработанному графу алгоритм Дейкстры [14], определим рациональный метод синтеза технологического обеспечения для ОУО. Алгоритм Дейкстры позволяет находить кратчайшие пути от одной из вершин взвешенного ориентированного графа ко всем остальным его вершинам, при условии отсутствия дуг отрицательного веса.

Приняв за основу граф процесса синтеза технологического обеспечения (рис. 3), состоящий из 6 рядов элементов включающих в себя n -элементов в ряду, которые соединены направленными дугами, задаемся их весом, характеризующим влияние конкретного элемента в ряду на формирование требуемых функциональных свойств в каждом функциональном элементе изделия.

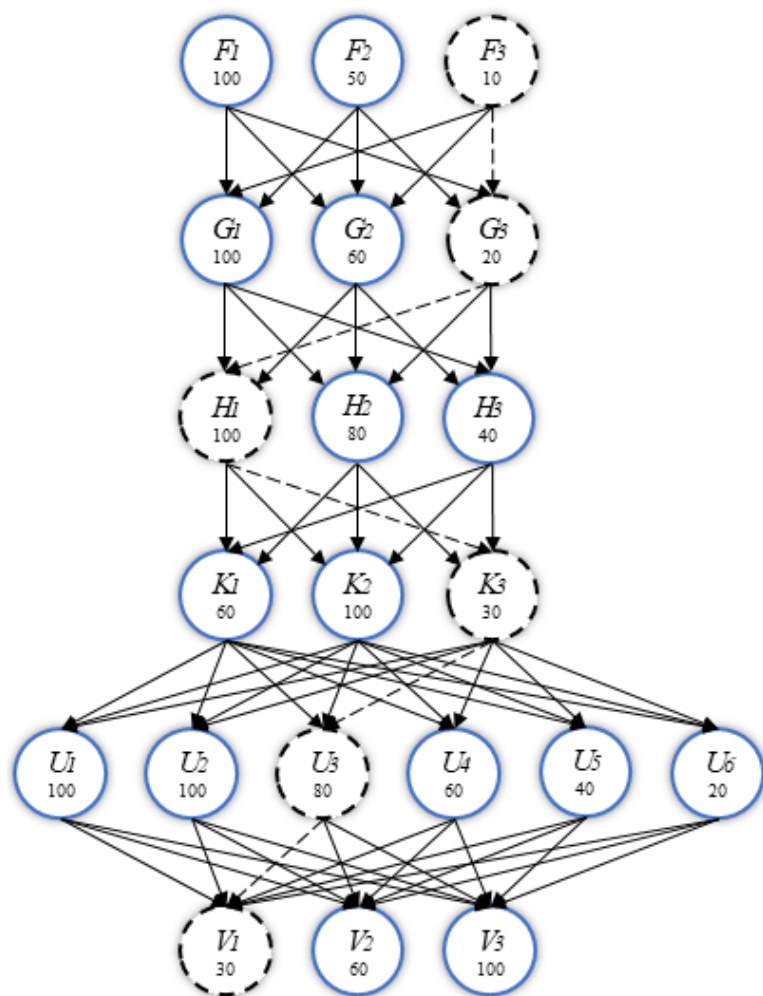


Рисунок 4. Граф процесса синтеза технологического обеспечения учитывающий удельный вес элементов: — генерируемое множество возможных вариантов ТО; — — рациональный вариант из рассмотренных вариантов при заданных исходных данных.

ковой требуемой исходно шероховатости и равном припуске на обработку.

Первый из рассматриваемых вариантов, характеризуется максимальной скоростью резания с минимальным усилием прижима, и будет иметь следующий вид:

$$F_1 \rightarrow G_3 \rightarrow H_3 \rightarrow K_2 \rightarrow U_3 \rightarrow V_2$$

Вес данного варианта будет равен:

$$\sum p = 100 + 20 + 40 + 100 + 80 + 60 = 400$$

Вес факторов, учитывающих варианты параметров соотношения элементов технологических средств полирования распределяем исходя из того, что с увеличением доли технологических средств увеличивается интенсивность полирования. Тогда вес этих факторов будет иметь следующий вес: 30, для соотношения 1:1; 60 – для 1:3 и 100 для 1:5.

Задавшись весом всех элементов всех рядов общий вид графа синтеза (рис. 3) для применения алгоритма Дейкстры, будет иметь вид (рис. 4).

Задачей использования этого алгоритма станет определение пути с минимальным весом дуги, за счет пошагового перебора всех вершин графа.

Рассмотрим 3 варианта синтеза ТО ОУО из возможного множества, и сравним их вес, для определения рационального. Данные варианты охватывают различные материалы полировального инструмента, технологических средств, используемых при полировании и режимов резания при одинаковой

Второй рассматриваемый вариант характеризуется величиной скорости резания 30 м/с и усилием прижима 50 Н будет иметь следующий вид:

$$F_2 \rightarrow G_3 \rightarrow H_2 \rightarrow K_1 \rightarrow U_3 \rightarrow V_3$$

Вес данного варианта будет равен:

$$\sum p = 50 + 20 + 80 + 60 + 80 + 100 = 390$$

Третий рассматриваемый вариант, характеризующийся минимальной скоростью резания и максимальным усилием прижима имеет вид:

$$F_3 \rightarrow G_3 \rightarrow H_1 \rightarrow K_3 \rightarrow U_3 \rightarrow V_1$$

Вес данного варианта будет равен:

$$\sum p = 10 + 20 + 100 + 30 + 80 + 30 = 270$$

Так, из трех рассмотренных вариантов, третий вариант обладает наименьшим весом, следовательно, является наиболее рациональным при заданных исходных данных.

3. Заключение

Таким образом, на основании анализа конструктивных особенностей и механизмов разрушения ЛТ ГТД определены ключевые факторы, используемые в качестве граничных условий в предложенной методике синтеза технологического обеспечения ОУО. Выбранные граничные условия, характеризующие процесс синтеза технологического обеспечения ОУО, разделены в группы:

- характеризующие деталь и заготовку;
- характеризующих режимы резания;
- характеризующие применяемый инструмент и оснастку.

Основываясь на выбранных граничных условиях составлена матрица и граф множества. Применяв к последнему алгоритм Дейкстры, можно определить рациональный метод синтеза технологического обеспечения среди сгенерированного множества существующих вариантов.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Абраимов, Н. В. Авиационное материаловедение и технология обработки металлов: Учеб. Пособие для авиационных вузов / Н. В. Абраимов, Ю. С. Елисеев, В. В. Крымов. – Москва: Высшая школа, 1998. – 444 с., ил.

2. Тихонов, А. С. Внедрение технологий «Цифрового двойника» применительно к оптимизации теплового состояния и повышению ресурса охлаждаемых лопаток промышленных газовых турбин / А. С. Тихонов, А. Ю. Тамм, А. В. Пивоварска // Сборник докладов LXV научно-технической сессии по проблемам газовых турбин и парогазовых установок «Фундаментальные проблемы исследований, разработок и реализации

научных достижений в области газовых турбин в российской экономике». – Санкт-Петербург: ОАО «ВТИ», – 2018. – С. 44-50.

3. Михайлов, А. Н. Основы синтеза механизма повышения ресурса лопаток турбины газотурбинного двигателя на базе функционально-ориентированного подхода / А. Н. Михайлов, А. В. Анастасьев, Н. С. Пичко // Международный сборник научных трудов: Прогрессивные технологии и системы машиностроения. – 2022. – № 4(79). – С. 35-43. – EDN LGNZXZ.

4. Налимов, Ю. С. Анализ повреждений лопаток газотурбинных двигателей / Ю. С. Налимов // Металл и литье Украины. – 2014. – № 12. – С. 17-22

5. Сутягин, А. Н. Современные проблемы технологии производства авиационных двигателей: Конспект лекций / А. Н. Сутягин. – Рыбинск: РГАТУ, – 2016. – 142 с.

6. Анализ условий работы поверхностных слоев рабочих лопаток турбины современных двигателей / М. А. Петрова, Мехди Саадатибаи, А. И. Тарасов / Научный вестник МГТУ ГА. 2015. №217 (7). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-usloviy-raboty-poverhnostnyh-sloev-rabochih-lopatok-turbiny-sovremennyh-dvigatelay> (дата обращения: 24.09.2022).

7. Хавлин, Т. В. Разработка метода повышения ресурса лопаток турбины вертолетного двигателя на базе функционально-ориентированного подхода / Т. В. Хавлин, А. Н. Михайлов, Д. А. Михайлов [и др.] // Инновационные перспективы Донбасса: Материалы 4-й Международной научно-практической конференции, Донецк, 22–25 мая 2018 года. – Донецк: Донецкий национальный технический университет, – 2018. – С. 136-139.

8. Михайлов, А. Н. Особенности технологического процесса повышения ресурса лопаток турбины авиационного двигателя на базе функционально-ориентированной технологии / А. Н. Михайлов, Т. В. Хавлин // Международный сборник научных трудов: Прогрессивные технологии и системы машиностроения. – 2017. – № 1(56). – С. 84-100.

9. Одрин, В. М. Морфологический анализ систем. Построение морфологических таблиц / В. М. Одрин, С. С. Картавов – Москва: «Наукова думка», – 1977. – 148 с.

10. Настасенко, В. А. Морфологический анализ – метод синтеза тысяч изобретений. Изд 2-е, перераб. и доп. / В. А. Настасенко – Херсон: Изд-во Айлант, – 2015. – 100 с.

11. Оре, О. Теория графов / О. Оре. – Москва: Наука, 1980. – 336 с.

12. Абраимов, Н. В. Авиационное материаловедение и технология обработки металлов: Учеб. Пособие для авиационных вузов / Н. В. Абраимов, Ю. С. Елисеев, В. В. Крымов. – Москва: Высшая школа, 1998. – 444 с., ил.

13. Киселев, С. П. Полирование металлов / С. П. Киселев – Москва: Машгиз, – 1961. – 74 с.

14. Gupta N. Applying Dijkstra's Algorithm in Routing Process / N. Gupta, K. Mangla, A. K. Jha, M. Umar Int. J // New Technol. Res, 2(5), 122-124 (2016).

Поступила в редколлегию 03.02.2023 г.

УДК 621.01

¹А. Н. Михайлов, д-р техн. наук, проф., ¹В. Б. Котляров, аспирант,

¹С. Б. Котляров, инженер, ²Б. С. Котляров, канд. техн. наук.

¹Донецкий национальный технический университет, г. Донецк, ДНР

²Ялта, Россия

Тел.: +7(988)-55-40-021; +7(985) 021-79-06, +7(964) 704-53-62;

E-mail: mntk21@mail.ru; velidarkotlarov@mail.ru; boris.kotlyarov@mail.ru

ОПТИМИЗАЦИЯ ФОТ-ПРОЦЕССА ПОДГОТОВКИ МОДИФИЦИРОВАННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПОД ФИНИШНЫЕ ОПЕРАЦИИ НАПЫЛЕНИЕМ И ОПРЕДЕЛЕНИЕМ ПРИПУСКОВ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ МЕХАНООБРАБОТКИ

В настоящей работе приведено описание результатов проведенных исследований относительно способов формирования геометрии и поверхностных свойств обрабатываемых деталей согласно требованиям КД - конструкторской документации деталей на основе применения ФОТ-воздействий. В работе приводится подход при применении ФОТ-воздействий для формирования бочкообразных зубьев блок-вала колес КПП, позволяющий вести расчет припусков для реализации финишных операций, например, под шевингование, в качестве подготовленной поверхности для финального формирования поверхностных свойств и геометрии и величины бочкообразности методом напыления.

Ключевые слова: деталь, часть, участок, зона, функция, обрабатываемая поверхность, припуск, фрезерование, ФОТ- воздействие, бочкообразность, шевингование, напыление поверхности.

A. N. Mihailov, B. S. Kotlyarov, V. B. Kotliarov, S. B. Kotliarov

OPTIMIZATION OF THE PHOTO-PROCESS OF PREPARATION OF MODIFIED SURFACES FOR FINISHING OPERATIONS BY SPUTTING AND DETERMINATION OF ALLOWANCES OF PRELIMINARY MACHINING

This paper describes the results of the studies carried out on the methods of forming the geometry and surface properties of the processed parts in accordance with the requirements of design documentation - design documentation of parts based on the use of FOT-effects. The paper presents an approach to the use of FOT-actions for the formation of barrel-shaped teeth of the block-shaft of the gearbox wheels, which makes it possible to calculate the allowances for the implementation of finishing operations, for example, for shaving, as a prepared surface for the final formation of surface properties and geometry and the value of barrel-shapedness by the spraying method.

Keywords: part, part, area, zone, function, surface to be treated, allowance, milling, PHOT-impact, barrel-shaped, shaving, surface spraying.

1. Введение

Одной из важных задач при производстве изделий и изготовлении деталей машин и механизмов машиностроительной сферы является минимизация затрат времени и материальных ресурсов для достижения требуемых параметров машин [1, 2]. Основной путь решения этой задачи в механообработке - это снижение машинного и вспомогательного времени обработки деталей. Такой эффект достижим за счет известного подхода создания рациональной формы и геометрии заготовок на предварительном этапе и формирования такого алгоритма обработки, при котором большая часть припуска снимается на начальных операциях, и минимизируется припуск для выполнения финишных операций. Важно правильно решать такие задачи при обработке деталей, имеющих закрытые контуры [3, 4], которые не позволяют выбирать широкий спектр оборудования и инструментов для процессов

формообразования и создания требуемых свойств поверхностей и материала для отдельных элементов, частей и зон деталей.

В настоящей работе рассмотрен вариант механической обработки модифицированных участков зубчатых венцов блок-вала ведомых колес, применяемых в КПП, работающих без разрыва потока передаваемой мощности [5, 6, 7, 8].

При этом исследования проведены для обработки бочкообразных зубьев [9, 10] ограниченного углового сектора с учетом эффективного формообразования заготовки, снятия максимального припуска на начальных операциях. Приведена система и алгоритм расчета припуска для осуществления финишной операции формообразования методом шевингования, и финальной аддитивной операции формообразования и с одновременным формированием требуемых поверхностных свойств методом напыления.

2. Цель и задачи

Цель настоящей работы заключается в создании функционально-ориентированного системного подхода к разработке технологии изготовления сложных в геометрическом и технологическом отношении деталей, имеющих ограниченный спектр использования существующих на предприятии технических средств и наличного станочного парка.

Развить применение разработанного ранее формализованного отображения функционально-ориентированных взаимосвязей конструктивных признаков элементов детали и технологических эффектов ФОТ-воздействий для разработки алгоритма создания комплексной технологии, позволяющей обрабатывать модифицированные бочкообразные зубья на топологически ограниченном участке зубчатого венца блока-вала колес.

Привести методику и систему расчета величин припусков для обработки фрезеруемой боковой поверхности бочкообразных зубьев, оставляемых для осуществления финишной операции шевингованием.

Полученная таким образом боковая поверхность модифицированных зубьев становится основанием для осуществления следующей аддитивной технологической операции методом напыления с использованием карбидов твердых металлов, завершающей окончательное формирование геометрии поверхности и поверхностных свойств зубьев на ограниченном участке и в заданных координатных зонах детали.

3. Основное содержание и результаты работы

Поставленная цель достигается тем, что на основании результатов проведенных ранее исследований [4, 6, 7, 8,] установлен формализованный образ целевой функции на примере детали блок-вал колес КПП без разрыва потока передаваемой мощности.

Синтез структурной схемы технологического процесса обработки с применением частных схем ФОТ-воздействия и поиск оптимального варианта формирования свойств детали можно проиллюстрировать на примере обработки блок-вала колес КПП (рис. 1).

Первоначально осуществляется анализ детали на функциональное предназначение частей элементов детали на примере блок-вала колес КПП. Части и элементы детали распределены по группам соответственно своему функциональному предназначению. Для каждой части детали проводится анализ элементов, на нашем примере более подробно рассматривается группа элементов зубчатого венца, в частности группы зубьев. Анализ функций зубьев показывает, что не все зубья

работают постоянно в одинаковых условиях в процессе эксплуатации. Основная группа зубьев работает в режиме передачи крутящего момента в плоскости зацепления с ведущей шестерней.

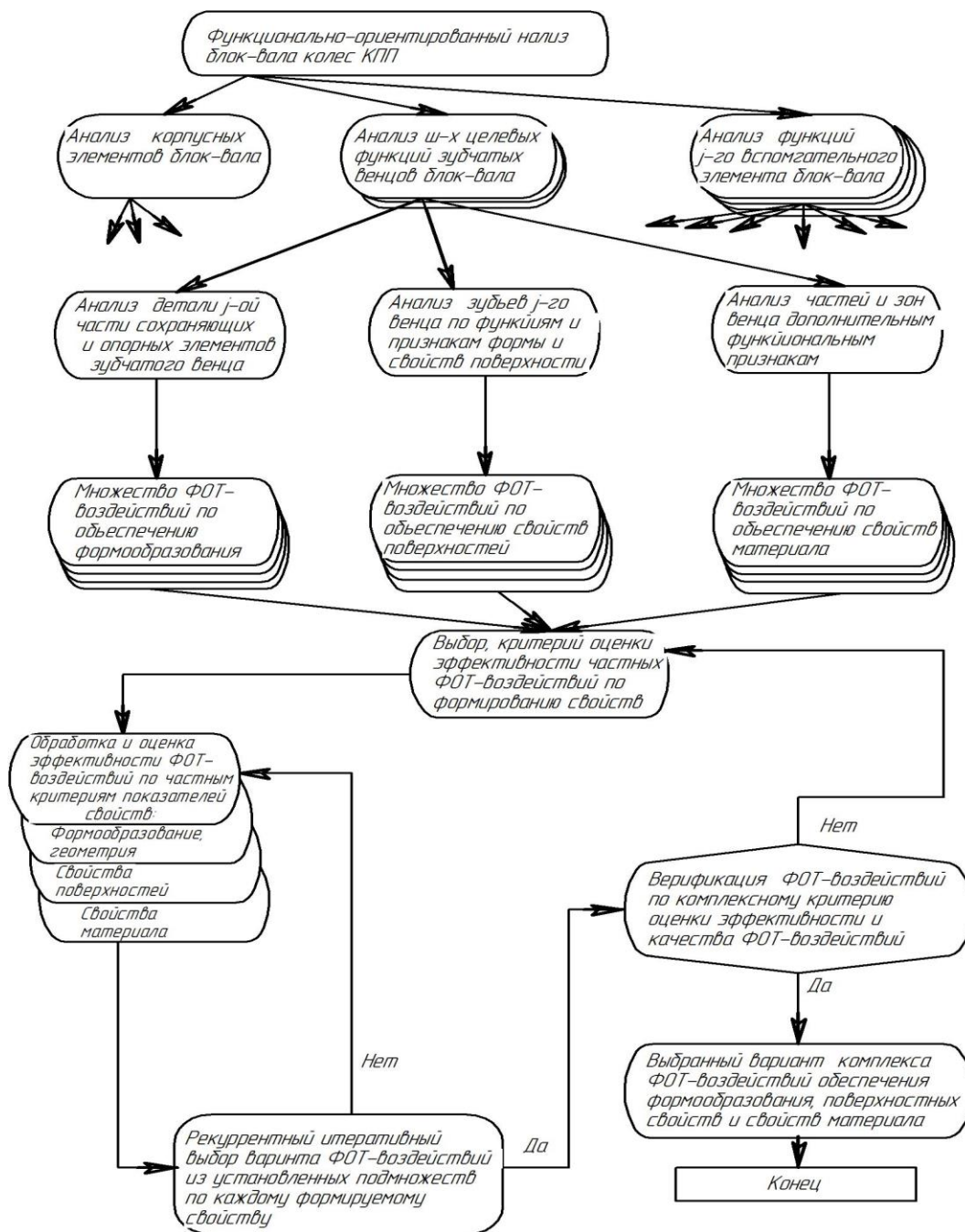


Рисунок 1. Алгоритм разработки процесса обработки зубчатых венцов блок-вала колес КПП.

Но имеется выделенная группа зубьев в ограниченном угловом секторе каждого зубчатого венца, которая в процессе переключения передач воспринимает осевые усилия и осуществляется смена зацепления шестерни с одного венца на другой в

составе блок-вала колес. В этот момент изменяется характер динамического нагружения зубчатого венца, что требует иных параметров геометрии и поверхностных свойств зубьев.

Для обеспечения достижения указанных размерных пределов этих параметров надо применить иные технологические приемы достижения результатов, отличные от тех, которые применимы для обработки основной группы зубьев.

Для использования формализованного подхода для каждого вида технологического воздействия при обработке каждого специфического элемента детали конкретизируется обобщенная формула ФОРТ-воздействия, приведенная ниже

$$T_j \Phi_{(j=1 \div j)}^{a_{xyz}} = f_k \left\{ K_{xyz}^{S^{g(1 \div g)}} \wedge K^{M_{i(i=1 \div i)}^{var}(xyz)} \right\} \quad (1)$$

В левой части выражения (1) символы T и Φ означают технологическое воздействие при формообразовании для каждой точки «а» в системе координат элемента детали по каждой линейной траектории от первой до заключительной линии прохода режущей точки в системе координат обрабатываемой поверхности детали. Символы XYZ – указывают топологическую локализацию каждого элемента в составе детали относительно общей системы координат детали.

При этом на различных участках число этих линий перемещения формообразующего элемента относительно обрабатываемой поверхности различное число. Технологическая схема предварительного нарезания зубьев среднего венца блок вала колес под напыление приведена на рис. 2.

Нарезание зубьев на двухвенцовых блок-валах трудностей не вызывает при выполнении на зубодолбежных станках с переустановкой. На трехвенцовых блок-валах зубонарезание среднего венца представляет определенные сложности. Для обработки необходимо создавать специальную оснастку для обработки пальцевым инструментом (например – в виде пальцевой или конической фрезы) по методу обкатки, а после фрезерования – шевингование боковых поверхностей зубьев.

Условные обозначения всех элементов зацепления приведены на рисунках. В технологической схеме нарезания зубчатого венца обеспечивается пять относительных движений, из которых – три прямолинейных движения, и два вращательных движения.

Вращательные движения – это главное движение резания, обороты формообразующей фрезы, а второе вращательное движение – круговое периодическое движение подачи на шаг резания при осуществлении каждого прохода фрезы вдоль линии резания на боковой поверхности. При этом одно прямолинейное движение со скоростью подачи $V_{пoнep}^{nod}$ обеспечивает перемещение фрезы вдоль зуба по ширине с обеспечением перебега после каждого прохода и предварительное врезание при каждом новом проходе.

Прямолинейным движением $V_{пpoд}^{nod}$ обеспечивается периодическая продольная подача на один шаг линии резания по высоте зуба, от головки до ножки зуба. Еще одно прямолинейное движение $V_{вepт}^{nod}$ выполняется для корректировки относительного положения режущей кромки и боковой поверхности зуба в процессе резания методом обкатки, в особенности при формировании бочкообразности профиля зуба.

Величины скоростей и шаг подачи по каждому из направлений выбирается исходя из марки обрабатываемого материала зубчатого венца, а также в зависимости от глубины резания, т. е. от толщины слоя снимаемого припуска $\delta_{пр}$ боковой поверхности зуба. Из понимания процесса видно, что после обработки на поверхности должны оставаться выступы в виде острых вершин, выступающих в зоне осуществления каждого прохода режущим инструментом.

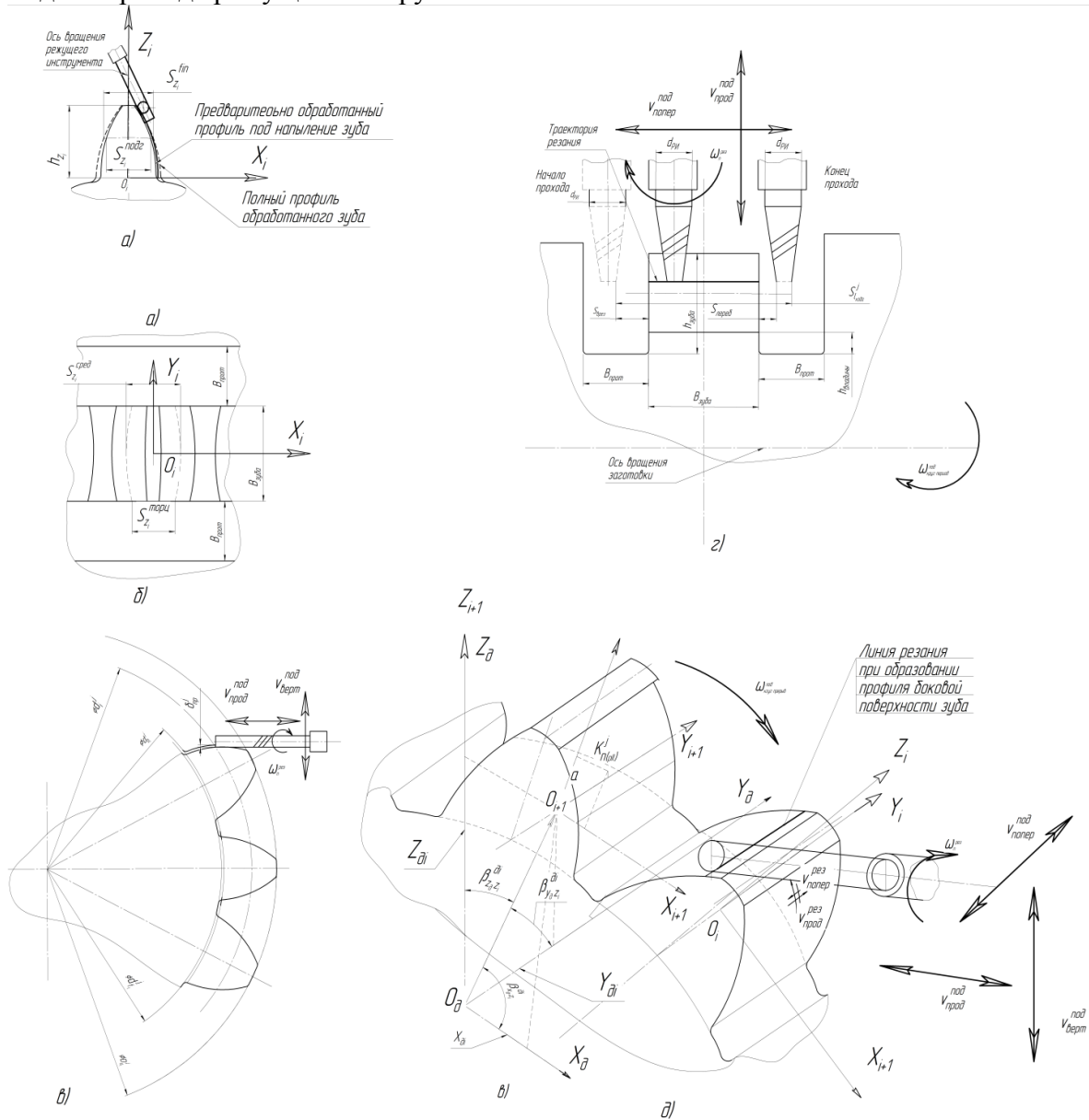


Рисунок 2. Технологическая схема формообразования профиля зубьев среднего зубчатого венца блок-вала колес: а) форма профиля зуба; б) окончательно сформированный зуб в плане; в) образующая линия режущего инструмента (РИ) срезает припуск; г) поперечный ход РИ при формировании каждой линии на проходе резания; д) аксонометрия заготовки в процессе формообразования профиля зубчатого венца и боковой поверхности зубьев.

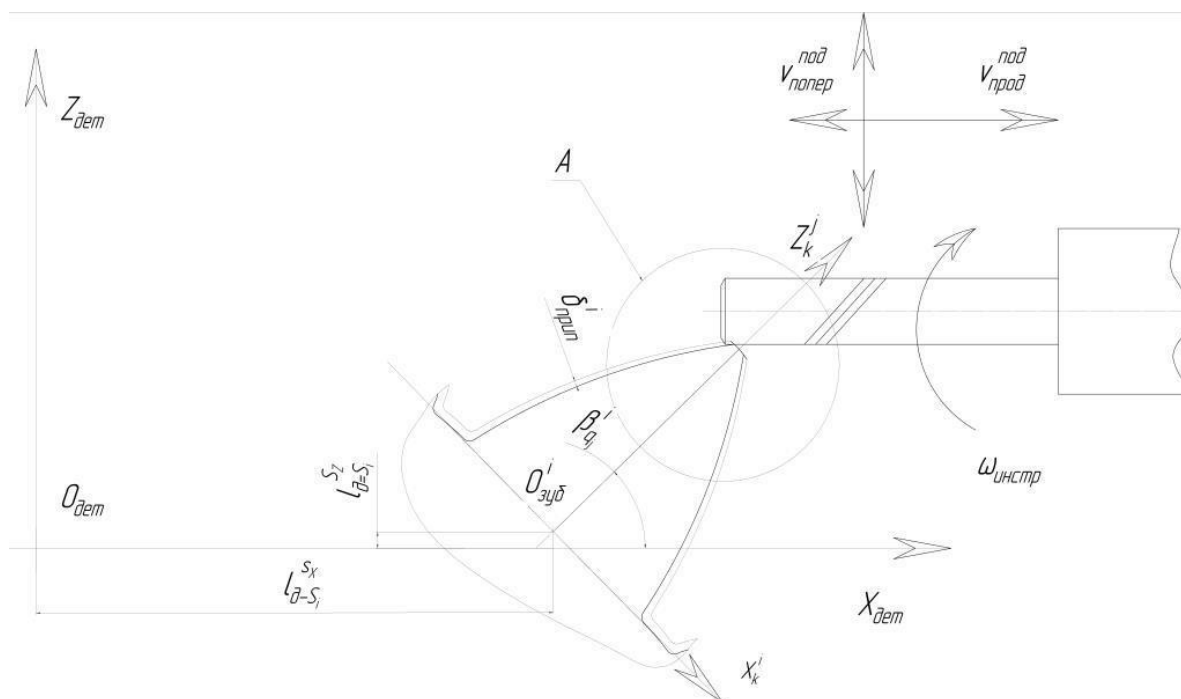
Поверхность зубьев представляет собой некую гребенчатую поверхность с параллельными гребнями на каждом шаге рабочей подачи инструмента. Высота этих выступов зависит от шага подачи инструмента в направлении формирования профиля, т.е. в плоскости, перпендикулярной оси блок-вала колес. От соотношения шага подачи и зоны эвольвенты профиля, и не зависит от величины снимаемого слоя припуска.

Зависимость от соотношения шага подачи и зоны профиля зуба определяется тем, что эвольвента на разных участках образуется с переменным радиусом кривизны. При этом на участках с более пологой кривой выступы будут иметь меньшие выступы, чем на участках с малым радиусом кривизны при осуществлении процесса резания с одни и тем же шагом подачи.

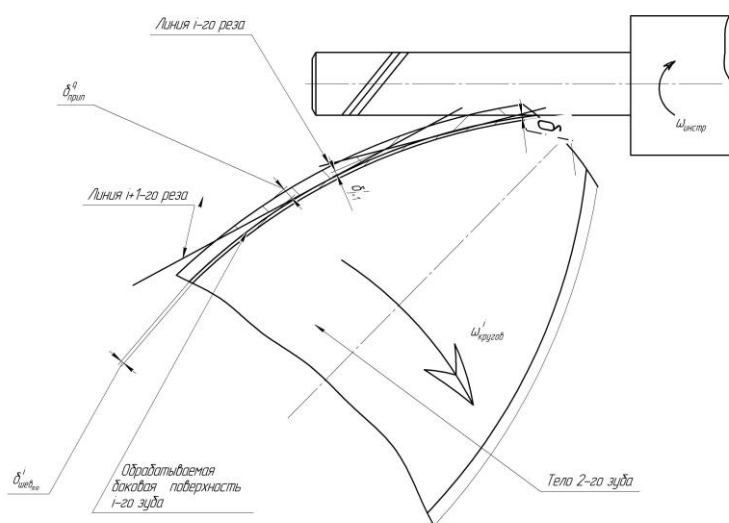
Поэтому высота выступов гребней под последующую обработку объективно в зоне ножки зуба имеют большую величину, чем в зоне головки зуба.

Дальнейшая параметризация показателей процесса обработки при формообразовании бочкообразных зубьев среднего венца блок-вала колес осуществляется расчетным путем. Схема для расчета направлений и величин скоростей резания и подач, включая прямолинейные и круговые, представлена на последующих рисунках: рис. 3, а и 3, б. При этом на рис. 3, б приведено расширение участка, представляющего схему последовательного удаления слоя припуска (рис. 3а) при каждом проходе фрезы по ширине зуба, где величина перебега и зоны врезания учитываются по схеме, показанной на рис. 2, г. На схемах указаны системы декартовых координат детали $X_d Y_d Z_d$ с центром $O_{дет}$, и каждого i -го зуба с центром $O_{iзуб}$ системы. Преобразование координат производится по известной схеме, изложенной ранее, и по источникам [4, 10, 11]. Центр системы координат каждого зуба в системе

координат детали определяется по осям X_d и Y_d в размерах: $l_{X_{d-S_i}}^{S_i}$ и $l_{Y_{d-S_i}}^{S_i}$ соответственно.



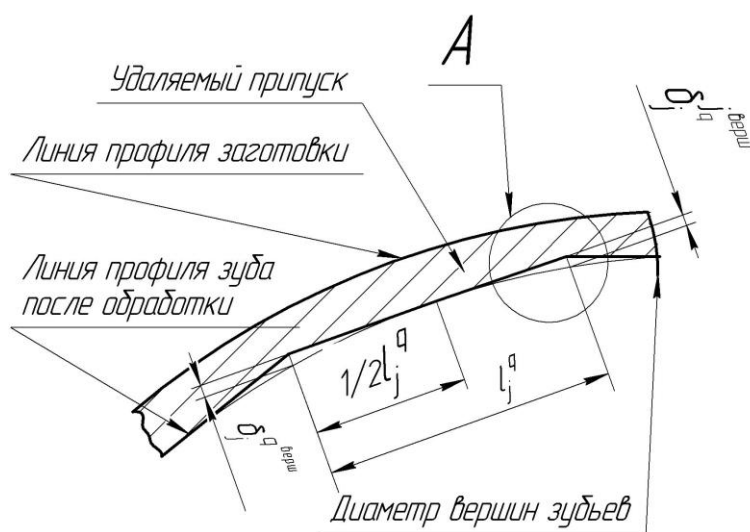
а)



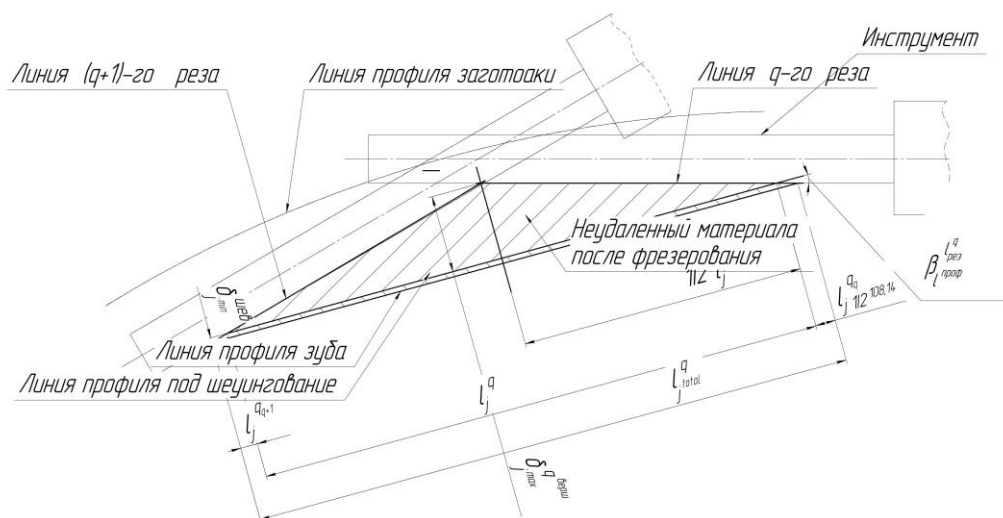
б)

Рисунок 3. Общая схема предварительного резерования боковой поверхности бочкообразных зубьев среднего венца блок-вала колес под последующую операцию шевингования: а) схема начала врезания инструмента – фрезы – у вершины зуба, при срезании первого слоя припуска, обеспечивающее формирование профиля под шевингование; б) схема, на которой дан последовательный порядок послойного срезания клиновидных припусков материала при каждом проходе фрезы вдоль профиля формируемой боковой поверхности зубьев.

На рис. 3, а, б указаны скорость вращения инструмента $\omega_{рез}$ и скорость круговой подачи $\omega_{кругов}$ обрабатываемого блок-вала колес, а также прямолинейные виды подачи инструмента продольной подачи $V_{прод}^{ход}$ и $V_{верт}^{ход}$.



а)



б)

Рисунок 4. Схемы последовательного формирования предварительной поверхности бочкообразных зубьев для финишной обработки шевингованием: удаляемые слои припуск при фрезеровании предварительного профиля зубьев; б) схема для расчета величины продольной подачи, обеспечивающей минимизацию вершин многогранного профиля под шевингование боковых поверхностей зубьев

Указаны порядок формирования линий реза, образующие многогранную поверхность вдоль эвольвентной образующей формы боковой поверхности зуба, полученную в результате пошаговой продольной подачи. При этом бочкообразность может формироваться плавной линией при обработке по программе на металлорежущем оборудовании с ЧПУ.

Фрезерование осуществляется с гарантированным минимальным припуском $\delta_{j\min}^{шев}$ под шевингование, ограниченным условиями процесса в диапазоне 0,02-0,05 мм. За счет длины линии реза на каждом проходе фрезы формируется граненая поверхность, где вершины граней создают максимальные величины припусков под шевингование. Для обеспечения оптимальной величины припуска необходимо рассчитать шаг продольной и круговой подачи, которые позволяют достигать достаточное качество обработки поверхностей. Для проведения расчета приведена упрощенная схема на рис. 5.

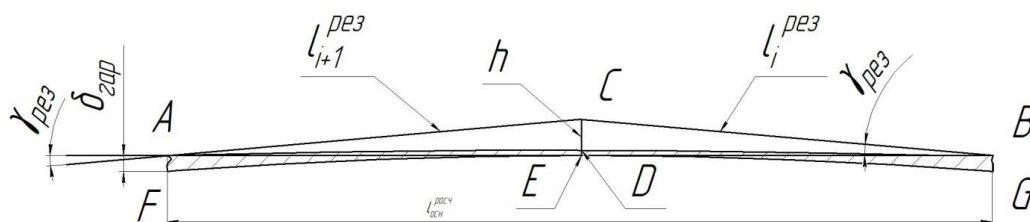


Рисунок 5. Схема расчета подач фрезерования и величины припуска под шевингование.

Расчетный треугольник BCD, образованный линией реза l_i^{pez} , линией BE, заменяющей для упрощения расчетной схемы линию BD. Ввиду малой разности изменения длины спрямленной линии за счет кривизны эвольвенты на рассматриваемом участке, можно применить способ замены эвольвенты на прямую линию, образующую угол γ_{pez} с линией l_i^{pez} . Поскольку определяющим фактором качества поверхности является высота гребня h – катет CE прямоугольного треугольника BCE, то величина продольной подачи $V_{подпрод}$ является аргументом функции $h = f(l_i^{pez})$. В этом случае для определения продольной подачи решать необходимо обратную задачу – нахождение аргумента по значению функции.

Длина дуги эвольвенты окружности в общем случае определяется в виде

$$L_{дуг.эвольв} = \frac{1}{2} R(t_2^2 - t_1^2), 0 \leq t_1 \leq t_2 \leq \infty, \tag{2}$$

где t_1 и t_2 – параметр первой точки и параметр второй точки дуги эвольвенты. При этом для произвольной точки t можно применить: $x = R(\cos t + t \sin t), y = R(\sin t - t \cos t)$ - параметрические уравнения абсциссы x эвольвенты окружности радиуса R и ординаты y эвольвенты окружности радиуса R [12].

- t – параметрическая переменная;

- x_i, y_i – абсцисса и ордината – абсцисса и ордината i -ой точки дуги эвольвенты.

Тогда $dl = \sqrt{(t^2(\cos^2 t + \sin^2 t)(dt)^2)} = t dt$. Длина дуги равна интегралу $2\pi \int t dt = (2\pi)^2/2 = 2\pi^2$.

На рис. 6 представлена схема образования эвольвенты профиля зуба, на которой определенно указана разница в радиусах, образующих эвольвенту зуба. По определению эвольвенты можно записать выражение соотношения величин: $r_{Y_i} > r_{Y_b} > r_{Y_a}$.

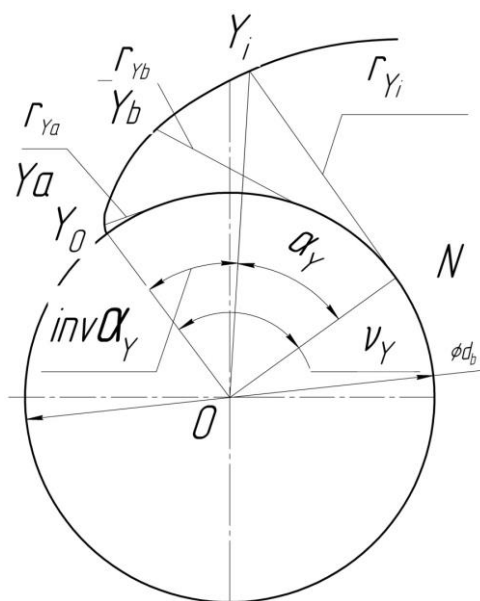


Рисунок 6. Схема образования эвольвенты зубьев венцов блок-вала колес КПП.

Здесь символы r_{Y_i} , r_{Y_b} , r_{Y_a} – величины участков касательных линий к основной окружности, которые являются одновременно мгновенными радиусами образования кривой соответственно в точках Y_i , Y_b , Y_a кривой, превращающейся в эвольвенту.

Вследствие этого высота h гребней будет переходить от минимального размера в зоне головки зуба к своему максимальному размеру в зоне ножки зуба. Такое переменное значение снимаемого припуска и его тенденция изменения в одном направлении должно быть учтено при обработке на чистовой операции шевингованием. Одновременно необходимо при планировании режимов резания (величин подач по всем осевым направлениям и скоростей вращения в процессе резания самого шевера и обрабатываемой детали).

Заключение

Проведенные в данной работе аналитические исследования применительно к разработке ФОТ-процесса обработке модифицированных бочкообразных зубьев зубчатых венцов блок-вала колес КПП без разрыва потока передаваемой мощности, безотносительно к типу производства (опытный образец или серийное производство, что безусловно налагает свои дополнительные связи на проектные работы), показали адекватность и актуальность системы создания функционально-ориентированных технологий в сфере машиностроения для разных деталей и узлов. Исследования позволили достичь поставленной в работе цели путем решения ряда частных задач:

1. Получило развитие и применение разработанного ранее формализованного отображения функционально-ориентированных взаимосвязей конструктивных признаков элементов детали и технологических эффектов ФОТ-воздействий для разработки алгоритма создания комплексной технологии, позволяющей обрабатывать модифицированные бочкообразные зубья на топологически ограниченном участке зубчатого венца блока-вала колес.

2. Разработана методика и система расчета величин припусков для обработки фрезеруемой боковой поверхности бочкообразных зубьев, оставляемых для осуществления финишной операции шевингованием.

3. Отмечены и указаны некоторые нюансы образования припусков переменной величины при обработке боковых поверхностей бочкообразных зубьев в закрытых зонах при постоянных режимах фрезерования на предварительных операциях.

4. Получено подтверждение, что сформированная таким образом боковая поверхность модифицированных зубьев становится основанием для осуществления следующей аддитивной технологической операции методом напыления с использованием карбидов твердых металлов, завершающей окончательной формирование геометрии поверхности и поверхностных свойств зубьев на ограниченном участке и в заданных координатных зонах детали.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Бурцев, В. М. Технология машиностроения, в 2 т. Т.1. Основы технологии машиностроения / Бурцев В. М., Васильев А. С., Дальский А. М. и др.; под ред. Дальского А.М. – Москва: Изд. МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001.
2. Базров, Б. М. Основы технологии машиностроения: Учебник для вузов / Б. М. Базров. – М.: Машиностроение, 2005. – 736 с.
3. Разработка технологического процесса изготовления деталей летательных аппаратов / Флек М. Б., Шевцов С. Н., Родригес С. Б., Сибирский В. В., Аксенов В. Н. – Ростов-на-Дону: ДГТУ, 2005. – 163с.

4. Котляров, Б. С. Основы структурного синтеза модификаций зубьев цилиндрических колес и схем многоинструментальных роторных машин для их формообразования: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / Б. С. Котляров – Харьков, 1989.
5. Михайлов, А. Н. Основы синтеза функционально-ориентированных технологий машиностроения / Михайлов А. Н. – Донецк: ДонНТУ, 2009. – 346с.
6. Михайлов, А. Н. Проявление атрибутов деталей машин как факторов разработки функционально-ориентированных технологий / Михайлов А. Н., Котляров Б. С., Котляров В. Б., Котляров С. Б. // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научных работ. – Донецк: ДонНТУ, 2020. – Вып. 3 (70). – С. 22-33. – ISSN 2073-3216, (E) ISSN 2518-7120.
7. Михайлов, А. Н. Синтез модели функционально-ориентированной технологической системы создания КПП без разрыва потока передаваемой мощности / Михайлов А. Н., Котляров В. Б., Котляров С. Б. // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научных работ. – Донецк: ДонНТУ, 2020. – Вып. 4 (71). – С. 35-43. – ISSN 2073-3216, (E) ISSN 2518-7120.
8. Михайлов, А. Н. Предпосылки создания новой схемы механической зубчатой КПП с переключением без разрыва потока передаваемой мощности / Михайлов А. Н., Котляров Б. С., Котляров В. Б. // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научных работ. – Донецк: ДонНТУ, 2020. – Вып. 2 (69) 2020. – С. 50-62. – ISSN 2073-3216, (E) ISSN 2518-7120.
9. Тайц, Б. П. Производство зубчатых колес / Тайц Б. П. – М.: Машиностроение, 1990. – 464 с.
10. Обработка зубчатых колес: учебное пособие / сост. Пегашкин В. Ф.; М-во образования и науки РФ: ФГАОУ ВО «УрФУ им. первого Президента России Б. Н. Ельцина», Нижнетагил. технол. ин-т (филиал). – Нижний Тагил: НТИ (филиал) УрФУ, 2016. – 132 с
11. Перепелица, Б. А. Разработка теории формообразования и проектирования режущих инструментов на основе многопараметрических отображений: дис. ... д-т техн. наук / Б.А. Перепелица; ХПИ – Харьков, 1981.
12. Выгодский, М. Я. Справочник по высшей математике / Выгодский М. Я. – М.: Наука, 1964. – 783с.

Поступила в редколлегию 06.02.2023 г.

УДК 62-229.3:621.01: 514.85

Ю. В. Пипкин, канд. техн. наук, доцент

Государственное образовательное учреждение высшего образования Луганской Народной Республики «Донбасский государственный технический институт», г. Алчевск, Луганская Народная Республика

Тел.: +7(959)-152-18-81; E-mail: yury-sizam@mail.ru**БАРИЦЕНТРИЧЕСКИЕ КООРДИНАТЫ НА БАЗИСЕ ОПОРНОГО ТРЕУГОЛЬНИКА ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ СИЛОВОГО ЗАМЫКАНИЯ СТАНОЧНОГО ПРИСПОСОБЛЕНИЯ**

В статье рассматривается задача определения реакций в опорных точках установочной базы при силовом замыкании заготовки в станочном приспособлении. Представлено решение этой задачи с позиций моделирования силового замыкания на основе принципа возможных перемещений. Показано, что итоговые формулы включают в себя барицентрические координаты относительно опорных точек установочной базы. Опорные точки установочной базы являются базисом барицентрических координат.

Ключевые слова: силовое замыкание, установочная база, опорные точки, барицентрические координаты, координатный базис на трех точках, станочное приспособление.

Yu. V. Pipkin**BARYCENTRIC COORDINATES ON THE SPECIFIED TO LOCATING POINTS TRIANGLE IN MODELING THE FORCE CLOSURE IN WORKHOLDING FIXTURE**

The article considers the problem of determining the reactions at the locating (reference) points of the setting base during the force closure of the workpiece in the workholding fixture. A solution to this problem is presented from the standpoint of modeling a force closure based on the principle of possible displacements. It is shown that the resulting formulas include barycentric coordinates relative to the locating (reference) points of the setting base. The locating points of the setting base are the basis of the barycentric coordinates.

Keywords: force closure, setting base, locating points, barycentric coordinates, coordinate basis on three points, workholding fixture.

Постановка проблемы. Станочные приспособления являются важной подсистемой технологической системы механической обработки. Выполненные на основе математического и натурального моделирования исследования силового замыкания фрезерного приспособления показали, что в технической системе станочного приспособления существуют такие безразмерные сочетания жесткостных параметров и силовых входных переменных, при которых погрешность обработки, связанная с упругими деформациями в опорах, минимизируется, приводя к повышению жесткости технологической системы и позволяя повысить производительность технологической операции [1]. Дальнейшие теоретические исследования для раскрытия механизмов установленных закономерностей требуют применения новых методов, органически связанных с уже имеющимися подходами.

Анализ состояния вопроса. Барицентрические координаты (БЦК), предложенные А. Ф. Мебиусом в 1827 году, находят сегодня применение в разнообразных практических приложениях. БЦК используются в методе конечных элементов [2], в компьютерной графике при геометрическом моделировании [3], в калориметрии при вычислениях цветности в RGB-плоскости [4, 5], для описания геометрии пространственных механизмов (роботов) [6], компьютерной анимации [7], химии и металлургии [5]. Междисциплинарное применение БЦК определяется в первую очередь простотой их введе-

ния, которая основывается на понятии центра масс системы материальных точек. Например, для системы двух материальных точек центр масс определяется по принципу «золотого правила механики» через равенство произведений массы в точках на расстояния до центра масс. Строгое описание БЦК можно найти в работах [5, 8-12].

Основная особенность введения БЦК заключается в том, что для задания (или определения) координат точки в n -мерном пространстве используется $n+1$ точка этого пространства – для задания координат на прямой (1-мерное пространство) используется 2 точки, связанные отрезком; на плоскости (2-мерное пространство) – 3 точки, не лежащие на одной линии (треугольник); в пространстве (3 измерения) – 4 точки, не лежащие в одной плоскости (тетраэдр). Такие точки называются базисными, а система точек – базисом БЦК. Координаты точки при этом задаются как значения масс в базисных точках таких, при которых выбранная точка является центром масс системы базисных точек, т.е. все массы в базисных точках относительно выбранной точки уравновешены.

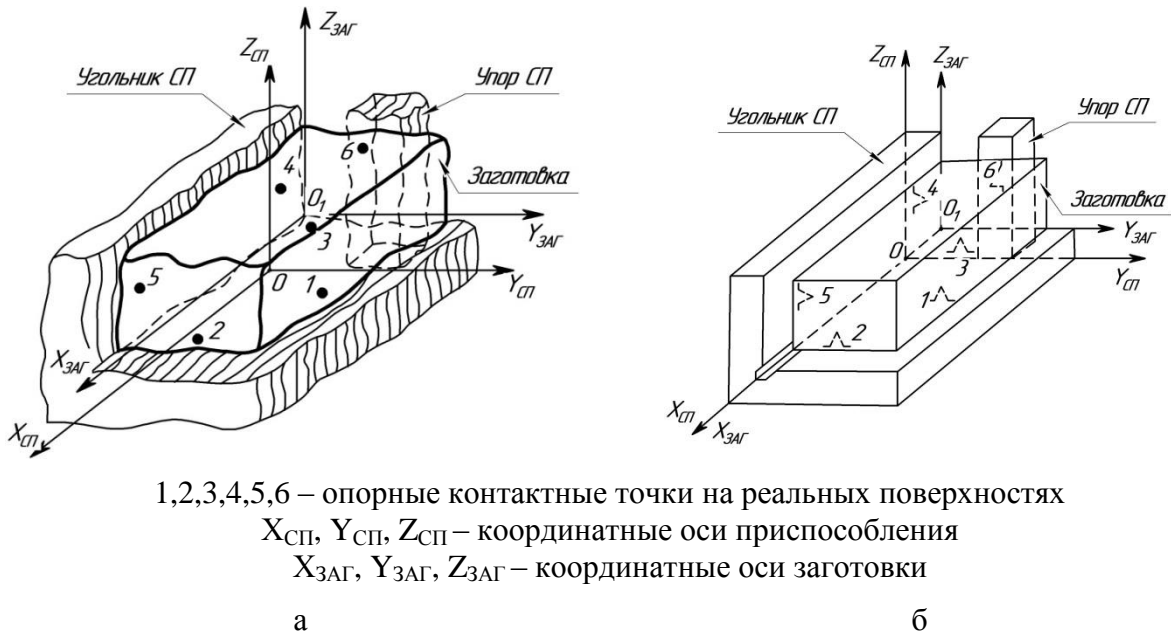
Учитывая многопрофильность применения и возможность переноса навыков использования данного универсального теоретического инструментария, дальнейший поиск практических приложений БЦК и их определение в конкретных практических задачах представляет научный и инженерный интерес.

В машиностроении в качестве одной из основных составляющих методики достижения геометрической точности деталей машин определены положения теории базирования [13]. Базирование детали для механической обработки на металлорежущем станке обеспечивается при ее установке (базировании и последующем закреплении прижимными усилиями) в станочном приспособлении (СП). При приложении зажимных сил заготовка полностью лишается 6-ти степеней свободы относительно приспособления и настроенного на размер режущего инструмента. Путем силового замыкания односторонние связи, накладываемые на заготовку опорными элементами, преобразуются в двухсторонние. Схема базирования предполагает установление 6-ти базовых точек, некоторые из которых могут быть неявными и скрытыми. Наиболее удобной базой является установочная явная база, реализуемая базовой плоскостью заготовки и обозначаемая 3-мя базовыми точками 1, 2, 3 (рис. 1).

Порядок выбора положения начала координат приспособления в точке O и заготовки в точке O_1 (рис. 1) стандартом не определен и является в большой степени произвольным. Из-за неопределенности выбора положения точки начала координат в устоявшихся методиках силового расчета и расчета на точность применение координатных систем не является обязательным.

Применение же БЦК на базисе опорных точек базирования представляется достаточно органичным. В качестве начала координат выступают базисные точки, положение которых задается теоретической схемой базирования, при этом она получает определенный геометрический смысл через расстояния между базисными базовыми точками.

В процессе решения задач моделирования силового замыкания была предложена базовая расчетная схема, в которую входят три опорных элемента, обеспечивающие базирование детали по плоскости и выполнение заданного от этой плоскости размера [14] (рис.2). Схема обеспечивает минимальную размерность математической модели силового замыкания [1].



1,2,3,4,5,6 – опорные контактные точки на реальных поверхностях

$X_{СП}, Y_{СП}, Z_{СП}$ – координатные оси приспособления

$X_{ЗАГ}, Y_{ЗАГ}, Z_{ЗАГ}$ – координатные оси заготовки

а

б

Рисунок 1. Базирование заготовки по трем плоскостям в «координатный угол»:
 а – базирование по реальным поверхностям;
 б – базирование идеальными поверхностями

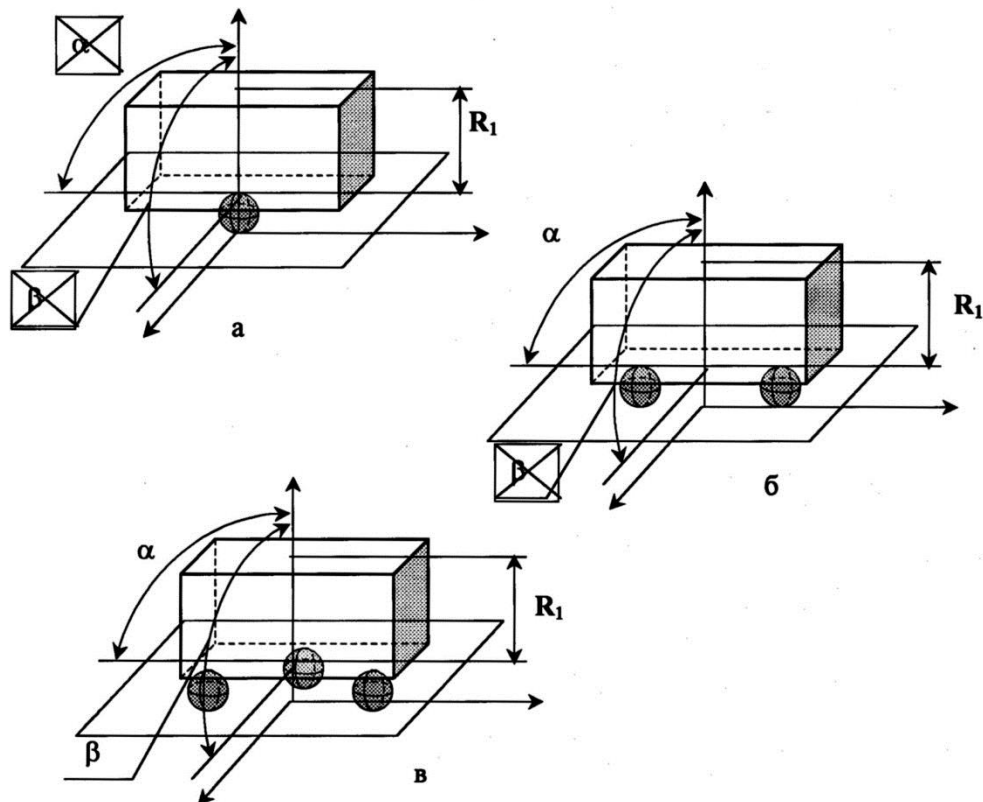


Рисунок 2. Модель установки заготовки плоской базовой поверхностью [14]:
 а – на один опорный шар (размер R_1 выдерживается только в одной точке);
 б – на два опорных шара (размер R_1 выдерживается по линии двух точек);
 в – на три опорных шара (размер R_1 выдерживается по всей плоскости)

В базовой расчетной схеме (рис. 2) опорные шары соответствуют базовым точкам 1, 2, 3 установочной базы на рисунке 1. Если принять эти точки в качестве базиса БЦК на плоскости, то для каждой точки плоскости можно определить три значения, однозначно определяющие ее положение относительно базисных базовых точек (рис. 3). Обозначим точки установочной базы как S_1, S_2, S_3 (буква «S» выбрана от заданного стандартом термина «установочная база» на английском «Setting base»). Расстояния между точками можно записать через точки концы отрезков $(S_1S_2), (S_2S_3), (S_1S_3)$. Для сокращения записи удобнее использовать обозначение длины с индексами точек - $(S_1S_2)=L_{12}, (S_2S_3)=L_{23}, (S_1S_3)=L_{13}$.

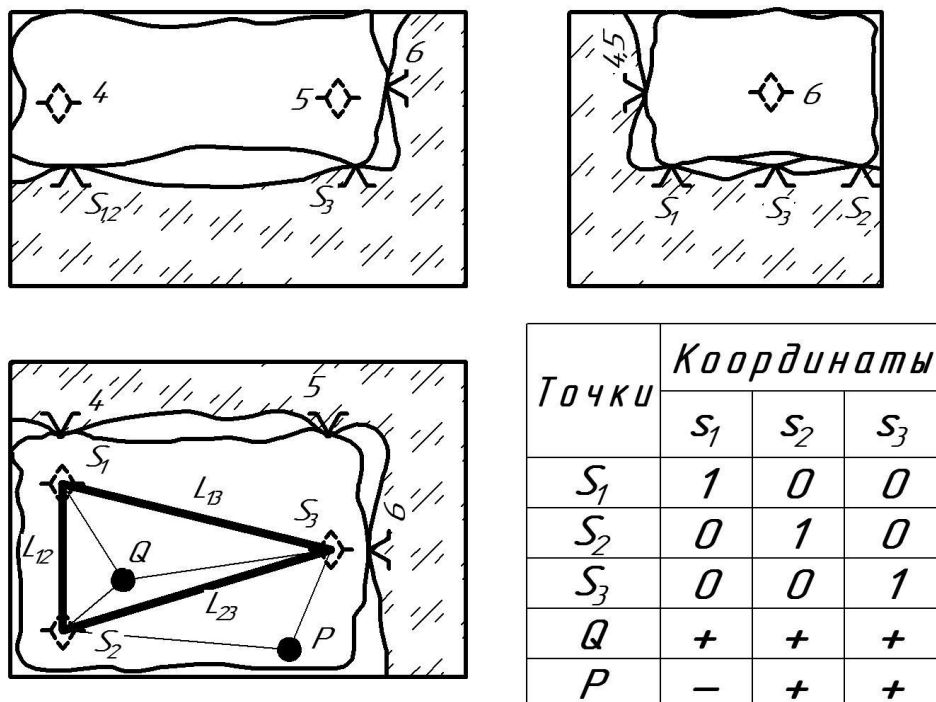


Рисунок 3. Введение барицентрических координат на базисе опорных точек установочной базы

Как отмечалось выше, в БЦК произвольная точка плоскости может быть задана единственным способом тройкой чисел (s_1, s_2, s_3) (см. таблицу на рис. 3), на основе которых можно получить значения масс, такие, что выбранная точка будет центром масс системы базисных точек, т.е. имеют место следующие равенства:

$m=m_1+m_2+m_3$ – масса m , приведенная к точке центра масс равна сумме масс в базисных точках;

$s_1= m_1/m, s_2= m_2/m, s_3= m_3/m$ – определение координат через отношения масс в точках к общей массе системы;

$s_1 + s_2 + s_3 = 1$ – необходимое условие единственности координат.

Одним из наиболее распространенных способов определения численных значений БЦК является нахождение отношения площадей треугольников, сформированных заданной точкой и базисными точками, к площади базисного треугольника, т.е. для точки Q (рис. 3) имеем:

$$s_{Q1} = \frac{S_{\Delta 23Q}}{S_{\Delta 123}}, \quad s_{Q2} = \frac{S_{\Delta 13Q}}{S_{\Delta 123}}, \quad s_{Q3} = \frac{S_{\Delta 12Q}}{S_{\Delta 123}} \quad (1)$$

где s_{Q1}, s_{Q2}, s_{Q3} - значение барицентрической координаты точки Q, соответственно в точках S_1, S_2, S_3 базисного треугольника;

$S_{\Delta 23Q}, S_{\Delta 13Q}, S_{\Delta 12Q}$ - площадь треугольников, определенных на точках, соответственно $(S_2, S_3, Q), (S_1, S_3, Q), (S_1, S_2, Q)$ (рис. 3);

$S_{\Delta 123}$ - площадь базисного треугольника, определенного на точках (S_1, S_2, S_3) .

Следует обратить внимание, что для точки, которая находится внутри базисного треугольника знаки координат положительные и все они будут по величине меньше 1. Но для точки, что находится вне базисного треугольника, координата, которая соответствует противоположной базисной точке, становится отрицательной, что видно из таблицы на рисунке 3 для точки P. При этом величина этой координаты определяется как разность $s_{P1}=1-(s_2 + s_3)$, т.е. $(s_2 + s_3) > 1$.

Целью данного исследования является обоснование применения БЦК в приложении к анализу силового замыкания станочного приспособления.

Материалы исследования. При выполнении анализа силового замыкания фрезерного приспособления на основе базовой расчетной схемы (рис. 2) требовалось учесть перераспределение сил и деформаций между тремя опорными элементами при воздействии активных сил - зажимной силы Q^n (обозначение «Q» принято на основе второй буквы английского значения термина «равновесие» - «equilibrium») и силы резания P^n (обозначение «P» принято на основе первой буквы английского значения термина «сила» - «power»). Активные силы действуют перпендикулярно (нормально) к плоскости опорного треугольника, что отражено индексом «n» при обозначениях сил – Q^n и P^n . Точка приложения зажимной силы как правило находится внутри треугольника опор (точка Q на рис. 3 и точка q на рис. 4), а точка приложения силы резания часто располагается вне треугольника опор (точка P на рис. 3 и точка p на рис. 4).

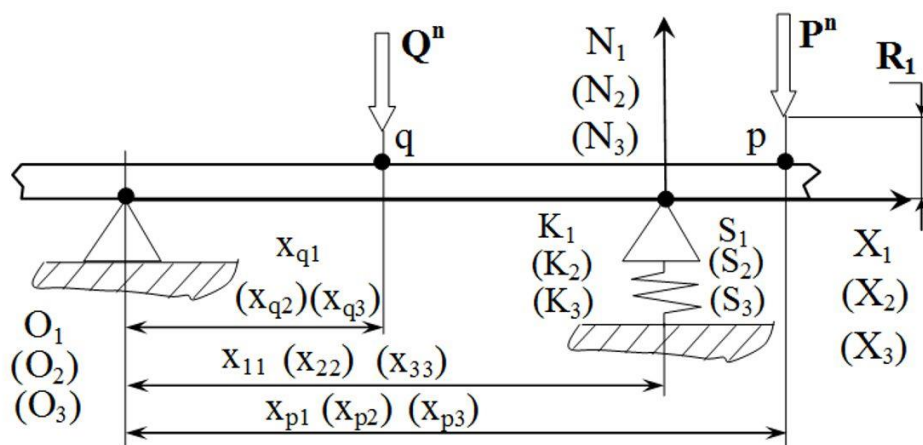


Рисунок 4. Расчетная схема для определения реакций в опорных точках установочной базы

Точки начала координат O_1, O_2, O_3 находятся на стороне, противоположной базовой точке. Таким образом, для базовой точки S_1 начало координат находится на стороне (S_2, S_3) . Для остальных базовых точек аналогично. При этом расстояние (O_1, S_1) должно быть наикратчайшим, что возможно только при опускании высоты из опорной (базовой) точки на противоположную сторону треугольника опор.

Следовательно, для определения реакций в опорах (а также, с учетом значений жесткостей K_i , - деформаций в опорах) рассматриваем одновременно три подсистемы (рис. 5), координатные оси которых направлены вдоль высот треугольника. Наименование осей « X_i » выбрано вследствие того, что эта координатная ось вводится первой, индекс « i » соответствует номеру вершины треугольника, из которой опущена высота. Положительное направление координатных осей – в направлении отрезка (S_i, O_i) .

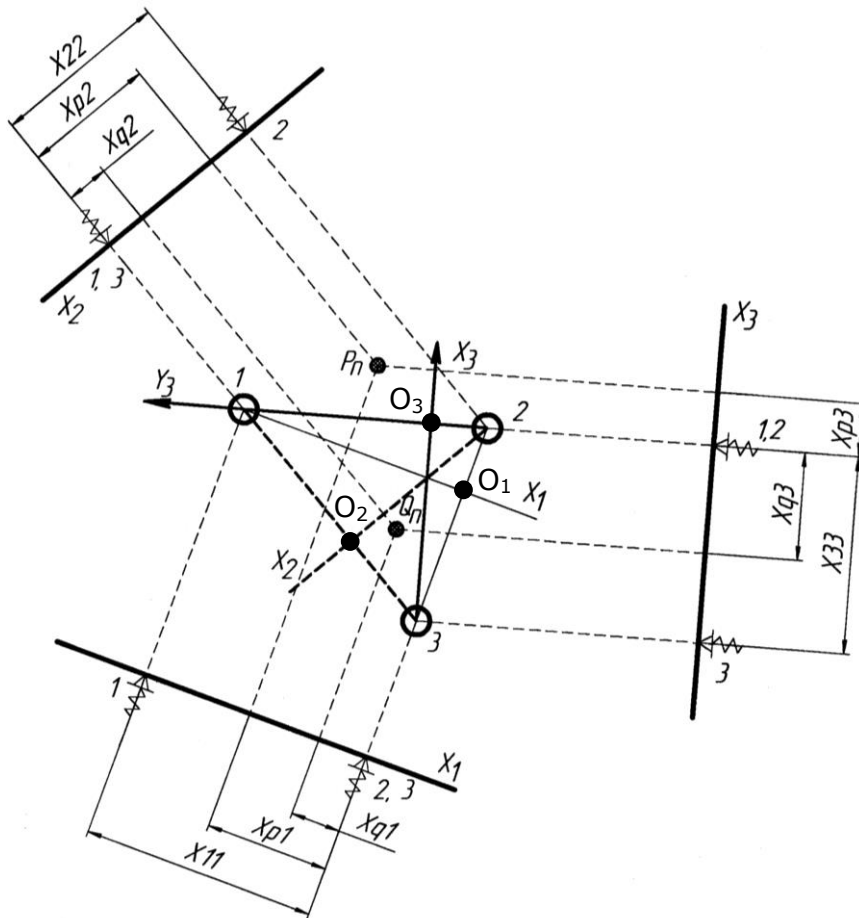


Рисунок 5. Подсистемы координатных осей для определения реакции в опорах

Из рисунка 5 можно видеть, что координаты точек соответствуют высотам, опущенным из этих точек на сторону треугольника опор, перпендикулярную оси X_i .

Для определения реакций в опорах под действием активных сил удобно рассмотреть возможные смещения системы силового замыкания – малые перемещения $\delta_{K1}, \delta_{K2}, \delta_{K3}$ в направлении упругих связей, соответственно в точках S_1, S_2, S_3 (рис. 6). При этом точки приложения зажимной силы и силы резания также получают свои перемещения δ_{q1} и δ_{p1} от δ_{K1} , δ_{q2} и δ_{p2} от δ_{K2} , δ_{p3} и δ_{p3} от δ_{K3} . На расчетной схеме (рис. 6) возможные перемещения представлены отрезками:

$\delta_{K1} = (S_{10}S_{1\delta})$, $\delta_{K2} = (S_{20}S_{2\delta})$, $\delta_{K3} = (S_{30}S_{3\delta})$ - где S_{i0} , $S_{i\delta}$, соответственно, точки начального «нулевого» и деформированного положения для «i» точки базисного треугольника;

$\delta_{q1} = (q_{01}q_{\delta1})$, $\delta_{q2} = (q_{02}q_{\delta2})$, $\delta_{q3} = (q_{03}q_{\delta3})$ - где q_{0i} , $q_{\delta i}$ аналогично соответственно точки начального «нулевого» и деформированного положения для «i» точки базисного треугольника;

$\delta_{p1} = (p_{01}p_{\delta1})$, $\delta_{p2} = (p_{02}p_{\delta2})$, $\delta_{p3} = (p_{03}p_{\delta3})$ - где p_{0i} , $p_{\delta i}$ аналогично соответственно точки начального «нулевого» и деформированного положения для «i»-й точки базисного треугольника.

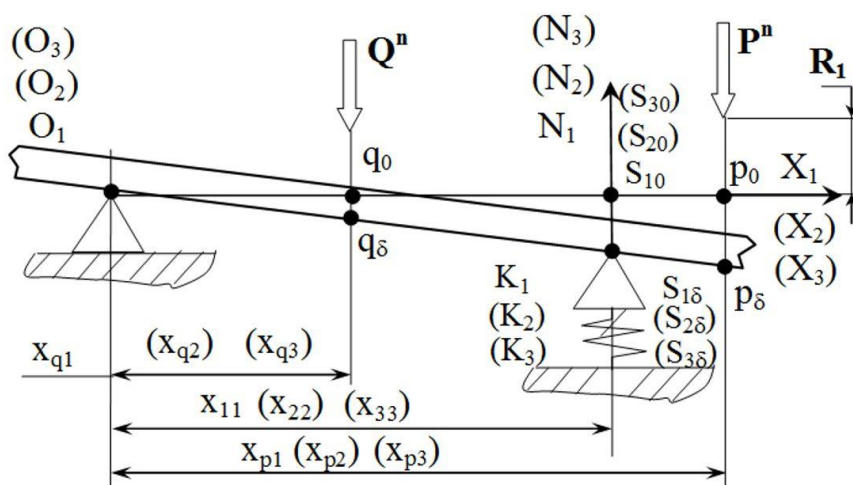


Рисунок 6. Возможные перемещения в направлении упругой связи в системе силового замыкания

На основе принципа возможных перемещений уравнения равновесия записываются как равенство нулю суммы работ действующих в системе сил на величине возможных перемещений:

$$N_1\delta_{K1} + Q^n\delta_{q1} + P^n\delta_{p1} = 0,$$

$$N_2\delta_{K2} + Q^n\delta_{q2} + P^n\delta_{p2} = 0,$$

$$N_1\delta_{K3} + Q^n\delta_{q3} + P^n\delta_{p3} = 0.$$

По схеме на рисунке 6 из подобия прямоугольных треугольников $\Delta(q_{0i}q_{\delta i}O_i)$, $\Delta(p_{0i}p_{\delta i}O_i)$, $\Delta(S_{i0}S_{i\delta}O_i)$ можно выразить возможные перемещения в точках приложения активных сил через возможное перемещение в «i»-й опоре с учетом отношения координат точек:

$$\frac{\delta_{qi}}{\delta_{Ki}} = \frac{x_{qi}}{x_{ij}} \text{ откуда } \delta_{qi} = \delta_{Ki} \frac{x_{qi}}{x_{ij}}; \text{ а также } \frac{\delta_{pi}}{\delta_{Ki}} = \frac{x_{pi}}{x_{ij}} \text{ откуда } \delta_{pi} = \delta_{Ki} \frac{x_{pi}}{x_{ij}}.$$

Тогда уравнения равновесия получают вид (для определения реакции в «i»-й опоре):

$$N_i \delta_{Ki} + Q^n \delta_{Ki} \frac{x_{qi}}{x_{ii}} + P^n \delta_{Ki} \frac{x_{pi}}{x_{ii}} = 0.$$

После выноса за скобки возможного перемещения δ_{Ki} и его сокращения, а также преобразования относительно неизвестной реакции, получаем выражение:

$$N_i = - \left(Q^n \frac{x_{qi}}{x_{ii}} + P^n \frac{x_{pi}}{x_{ii}} \right). \quad (2)$$

Как уже отмечалось выше, координаты точек в принятых координатных осях ($O_i X_i$) представляют собой высоты, опущенные из этих точек на стороны базисного треугольника (рис. 3 и 5). Таким образом, площадь треугольников, используемых для определения значения БЦК по формулам (1) может быть определена через произведение высоты на соответствующую сторону:

$$S_{\Delta 23Q} = \frac{1}{2} x_{q1} \cdot L_{23}, \quad S_{\Delta 13Q} = \frac{1}{2} x_{q2} \cdot L_{13}, \quad S_{\Delta 12Q} = \frac{1}{2} x_{q3} \cdot L_{12} \quad \text{- для точки } q;$$

$$S_{\Delta 23P} = \frac{1}{2} x_{p1} \cdot L_{23}, \quad S_{\Delta 13P} = \frac{1}{2} x_{p2} \cdot L_{13}, \quad S_{\Delta 12P} = \frac{1}{2} x_{p3} \cdot L_{12} \quad \text{- для точки } p;$$

$$S_{\Delta 123} = \frac{1}{2} x_{11} \cdot L_{23} = \frac{1}{2} x_{22} \cdot L_{13} = \frac{1}{2} x_{33} \cdot L_{12} \quad \text{- для базисного треугольника.}$$

Подставляя полученные площади в (1) определим значение БЦК на базе точек установочной базы:

$$s_{Q1} = \frac{S_{\Delta 23Q}}{S_{\Delta 123}} = \frac{x_{q1} \cdot L_{23}}{2} \frac{2}{1 \cdot x_{11} \cdot L_{23}} = \frac{x_{q1}}{x_{11}}, \quad s_{Q2} = \frac{S_{\Delta 13Q}}{S_{\Delta 123}} = \frac{x_{q2} \cdot L_{13}}{2} \frac{2}{1 \cdot x_{22} \cdot L_{13}} = \frac{x_{q2}}{x_{22}},$$

$$s_{Q3} = \frac{S_{\Delta 12Q}}{S_{\Delta 123}} = \frac{x_{q3} \cdot L_{12}}{2} \frac{2}{1 \cdot x_{33} \cdot L_{12}} = \frac{x_{q3}}{x_{33}} \quad \text{- для точки } q;$$

$$s_{P1} = \frac{S_{\Delta 23P}}{S_{\Delta 123}} = \frac{x_{p1} \cdot L_{23}}{2} \frac{2}{1 \cdot x_{11} \cdot L_{23}} = \frac{x_{p1}}{x_{11}}, \quad s_{P2} = \frac{S_{\Delta 13P}}{S_{\Delta 123}} = \frac{x_{p2} \cdot L_{13}}{2} \frac{2}{1 \cdot x_{22} \cdot L_{13}} = \frac{x_{p2}}{x_{22}},$$

$$s_{P3} = \frac{S_{\Delta 12P}}{S_{\Delta 123}} = \frac{x_{p3} \cdot L_{12}}{2} \frac{2}{1 \cdot x_{33} \cdot L_{12}} = \frac{x_{p3}}{x_{33}} \quad \text{- для точки } p.$$

Полученные отношения в форме $s_{Qi} = \frac{x_{qi}}{x_{ii}}$ и $s_{Pi} = \frac{x_{pi}}{x_{ii}}$ соответствуют отношениям координат в формуле (2), которая может быть переписана через БЦК:

$$N_i = - \left(Q^n s_{Qi} + P^n s_{Pi} \right). \quad (3)$$

Из полученного выражения следует, что величина реакции в опоре базисного треугольника установочной базы определяются как сумма произведений активных сил на величину барицентрической координаты точки приложения каждой из этих сил. Так

как количество активных сил было выбрано безусловно, то выражение (3) можно переписать в общем виде:

$$N_i = - \left(\sum_1^k Q_k^n s_{Q_k i} + \sum_1^f P_f^n s_{P_f i} \right), \quad (4)$$

где k и f - произвольные целые числа, соответствующие количеству точек приложения зажимных сил и сил резания;

$s_{Q_k i}$ и $s_{P_f i}$ - барицентрические координаты точек Q_k и P_f в «i»-й точке базисного треугольника.

Знак «-» перед скобками в выражениях (2), (3) и (4) означает, что реакция в опоре направлена против виртуального перемещения, допускаемого жесткостью опоры. Значение «-» барицентрических координат для определенной точки будет означать изменение направления реактивной силы в соответствующей опорной точке для данной активной силы в этой точке.

Следует также отметить, что при анализе равновесия при силовом замыкании станочного приспособления постановка задачи определения барицентрических координат отличается от изначальной [8-12]. Классические БЦК на плоскости определяются как задание таких значений масс в точках базисного треугольника, при которых в заданной точке будет находиться центр масс системы материальных точек, состоящей из точек базисного треугольника. При расчете величины реакций в опорах станочного приспособлений задача принимает следующий вид – определение величины и направления реакций в опорах базисного треугольника, при которых активная сила, заданная в точке приложения, будет уравниваться реакциями в опорах (базисных точках). В такой постановке задача определения БЦК формулируется впервые и требует дальнейшего анализа.

Выводы. Представленные результаты показывают, что выражения для определения величины реакции в базовых (опорных) точках установочной базы, полученные на основе принципа виртуальных перемещений в форме (2), включают в себя соотношения координат, которые совпадают с барицентрическими координатами, заданными на плоскости трех базисных точек, соответствующих опорным точкам.

Таким образом, можно рекомендовать применение БЦК для математического моделирования и анализа расчетных схем силового замыкания станочного приспособления.

При этом теоретическая схема базирования, выраженная 6-тью базовыми опорными точками получает конкретное геометрическое содержание – как набор параметров базисного треугольника в виде длин сторон и углов. Этот набор параметров служит основой для определения площади базисного треугольника, необходимой для определения значений БЦК.

Для развития методики силового расчета станочных приспособлений получены выражения с БЦК для определения реакции в базисных базовых точках установочной базы в форме (3) для двух активных сил (одной зажимной и одной резания) и в форме (4) для произвольного количества активных сил.

Важным теоретическим результатом приведенного анализа является то, что инструментарий БЦК получил приложение к практической задаче для апробации обще-

теоретических выкладок в области геометрии треугольников [9-11] и геометрии масс [5, 8, 12].

ЛИТЕРАТУРА:

1. Пипкин, Ю. В. Обоснование параметров фрезерных приспособлений моделированием силового замыкания: автореф. дис. ... канд. техн. наук [Электронный ресурс] / Ю. В. Пипкин ДонГТУ. – Алчевск: 2020. – 21 с. Доступ: https://www.dstu.education/ru/ru/files/sovet_donstu/diss/auto_pipkin.pdf (дата обращения 16.10.2022)
2. Сычугова, Е. П. Метод конечных элементов для решения уравнения переноса на неструктурированных тетраэдральных сетках / Е. П. Сычугова, Е. Ф. Селезнев // Препринт. Ин-т проблем безопас. развития атом. энергетики РАН. – № 03. – М. ИБРАЭ РАН, 2014. – 21 с.
3. Tao J. A Fast Numerical Solver for Local Barycentric Coordinates / Jiong Tao, Bailin Deng, Juyong Zhang // Computer Aided Geometric Design. - 2019. - № 3 (70). - P. 46-58.
4. Волошинов, А. В. Концепция барицентра и компьютерная колориметрия живописных образов / А. В. Волошинов, В. В. Фирстов // Математика. Компьютер. Образование. Сб. трудов XII международной конференции; под общ. ред. Г. Ю. Ризниченко. – Ижевск: Научно-издательский центр "Регулярная и хаотическая динамика", 2005. – Т. 2. – С. 502-511.
5. Балк, М. Б. Геометрия масс. / М. Б. Балк, В. Г. Болтянский. М.: Наука., 1987. – Вып. 61. – 160 с.
6. Корецкий, А. В. Компьютерное моделирование кинематики манипуляционных роботов. / А. В. Корецкий, Н. В. Осадченко. - М.: Изд-во МЭИ, 2000. – 48 с.
7. Veacco A. Footstep parameterized motion blending using barycentric coordinates / A. Veacco, N. Pelechano, M. Kapadia, N.I. Badler // Computers & Graphics. – 2015. – 47. – P. 105–112.
8. Балк, М. Б. Геометрические приложения понятия о центре тяжести / М. Б. Балк– М.: ФИЗМАТГИЗ, 1959. – Вып. 9. – 233 с.
9. Мякишев, А. Г. Элементы геометрии треугольника / А. Г. Мякишев. – М.: МЦНМО, 2002. – 32с.:ил.
10. Понарин, Я. П. Элементарная геометрия: В 3-х т. Т. 3. Треугольники и тетраэдры. – М.: МЦНМО, 2009. – 192 с.
11. Шкроба, С. П. Векторно-координатная геометрия относительно треугольника. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2014. — 396 с
12. Заставный, В. П. Геометрия масс: учебное пособие / В. П. Заставный. – 2-е изд., перераб. и доп. – Донецк: ДонНУ, 2021 . – 111 с.
13. ГОСТ 21495-76. Базы и базирование. Термины и определения. – М: Изд-во стандартов, 1990. – 37 с.
14. Пипкин, Ю. В. Базовая расчетная схема силового замыкания в станочных приспособлениях. / Ю. В. Пипкин, А. Н. Зелинский, Н. В. Коцюбинская // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научн. трудов. – Донецк: ДонНТУ, 2006. – Вып. 31. – С. 227-237.

Поступила в редколлегию 23.01.2023 г.

УДК 621.01.03.075

¹А. Н. Тюрин, д-р техн. наук, проф., ²А. В. Королев, д-р техн. наук, проф.¹ Западно-Казахстанский инновационно-технологический университет, г. Уральск, Республика Казахстан² Саратовский государственный технический университет им. Ю.А. Гагарина, г. Саратов, Россия

Тел. / факс 8-777-563-46-17, E-mail: turin56@mail.ru

ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ КОМБИНИРОВАННОЙ РАЗМЕРНОЙ И СУПЕРФИНИШНОЙ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ ПОДШИПНИКОВ

В статье проведен анализ методов окончательной обработки криволинейных поверхностей вращения деталей машин, которые отличаются схемой обработки, режимами и видами режущего инструмента. В качестве чистовой размерной обработки деталей в подшипниковом производстве обычно используется процесс шлифования. Однако из выполненного анализа следует, что поиск дальнейшего повышения эффективности чистовой обработки деталей следует осуществлять в направлении использования высокопроизводительных методов обработки, обеспечивающих одновременно высокое качество обработанной поверхности. Такие методы должны иметь высокое значение коэффициента полезной энергии и низкое значение скорости единовременного объемного разрушения материала. Если учесть, что при шлифовании на процесс выхаживания затрачивается дополнительное время и единовременная глубина обработки намного выше, чем при суперфинишировании, то становится очевидной повышенная эффективность совмещенного процесса ЭХО и суперфиниширования для чистовой обработки деталей.

Ключевые слова: шлифование, суперфиниширование, электро-химическая обработка (ЭХО), чистовая обработка деталей.

A. N. Tyurin, A. V. Korolev

JUSTIFICATION OF THE TECHNOLOGY OF COMBINED DIMENSIONAL AND SUPER FINISHING OF BEARING PARTS

The article analyzes the methods of final processing of curved surfaces of rotation of machine parts, which differ in the processing scheme, modes and types of cutting tools. The grinding process is commonly used as a finishing dimension for parts in the bearing industry. However, it follows from the performed analysis that the search for a further increase in the efficiency of finishing parts should be carried out in the direction of using high-performance processing methods that simultaneously ensure high quality of the machined surface. Such methods should have a high value of the useful energy coefficient and a low value of the rate of one-time volumetric destruction of the material. Considering that grinding requires additional time for the spark-out process and the one-time depth of processing is much higher than with superfinishing, the increased efficiency of the combined ECHO and superfinishing process for finishing parts becomes apparent.

Keywords: grinding, superfinishing, electrochemical machining (ECM), finishing of parts.

На современном этапе развития машиностроения разработано много методов окончательной обработки криволинейных поверхностей вращения деталей машин, которые отличаются схемой обработки, режимами и видами режущего инструмента. В качестве чистовой размерной обработки деталей в подшипниковом производстве обычно используется процесс шлифования. До сих пор считается, что процесс шлифования - наиболее эффективный процесс высокоточной размерной обработки, и поэтому в подшипниковом производстве он занимает до 70% от всей трудоемкости изготовления деталей подшипников.

Однако, как известно, процесс шлифования имеет множество серьезных недостатков, которые трудно устранить его оптимизацией [1, 2, 3-7 и др.]. В определенных

условиях шлифованием можно снизить величину шероховатости обрабатываемой поверхности до $R_a = 0,080$ мкм. Однако высокие скорости нагрева поверхностных слоев детали и неравномерное распределение температуры в процессе шлифования (до 1200°C) образуют ожоги, трещины. Локальный нагрев поверхностных слоев вызывает структурные фазовые превращения в слоях разной глубины.

По данным профессора Д.Г. Евсеева [5], С.Н. Корчака [6] и профессора С.И. Редько [7] и других исследователей этого процесса дефектный слой поверхностей, обработанных шлифованием, колеблется от 30 до 110 мкм. Кроме того, шлифованные поверхности имеют большой разброс параметра шероховатости и значительные отклонения геометрической формы в виде некруглости и волнистости. В процессе шлифования в поверхностном слое деталей появляются внутренние напряжения, существенно снижающие работоспособность деталей. Таким образом, процесс шлифования хотя и необходим для достижения заданной точности размера и геометрической формы деталей, но при изготовлении таких ответственных поверхностей, как дорожки качения подшипников, он не может быть рекомендован как окончательный технологический процесс. Поэтому после операций шлифования дорожек качения колец подшипников в подшипниковом производстве обычно осуществляется доводочные операции. Однако на этих доводочных операциях снимается такой малый припуск, который часто не превышает величину дефектного слоя, и, следовательно, не гарантирует высокого качества изготовления подшипников.

Для процессов, осуществляющихся длительный промежуток времени, каким является процесс шлифования, в качестве критерия, отражающего затраты энергии, следует использовать удельную мощность резания:

$$W_v = \frac{P_z \cdot v}{V},$$

а в качестве показателя качества процесса резания - единовременный объем снимаемого припуска единичным абразивным зерном, определяемый отношением единовременной работы резания к удельной энергии насыщения (4.16):

$$V_{iz} = 2,5 \frac{P_{nr} \cdot v}{51\tau(1 + \xi)} \varphi,$$

где φ - коэффициент потери энергии, определяемый по формуле:

$$\varphi = \frac{P_z - P_n f_t}{P_z}.$$

По данным работы [6], при врезном чистовом шлифовании закаленных стальных деталей диаметром 40 мм рекомендуются условия, приведенные в табл. 1.

Таблица 1. – Рекомендуемые условия круглого врезного шлифования

| Наименование параметров процесса шлифования | Размерность | Численные значения |
|---|-------------|--------------------|
| Характеристика инструмента | | 25A40CM16K |
| Поперечная подача | мм/мин. | 0,3 |
| Окружная скорость круга | м/с | 50 |
| Окружная скорость заготовки | м/мин. | 150 |
| Время выхаживания | мин. | 0,1 |
| Удельная мощность шлифования | Вт/мм длины | 40 |

По известной мощности шлифования при длине профиля $l_z=10$ мм можно найти силу резания:

$$P_z = \frac{W \cdot 10}{v} = \frac{40 \cdot 10}{50} = 8H.$$

Так как при суперфинишировании сила прижима бруска к обрабатываемой поверхности обычно находится в пределах 50-150 Н, а, следовательно, тангенциальная сила резания составляет 20-60 Н., то сила резания при шлифовании в несколько раз меньше, чем при суперфинишировании.

Коэффициент шлифования ориентировочно равен 0,43[7]. Тогда коэффициент полезной энергии при шлифовании:

$$\varphi = \frac{P_z - P_n \cdot f_t}{P_z} = 1 - \frac{0,2}{0,43} = 0,53.$$

Анализируя это значение можно заметить, что коэффициент полезной энергии при шлифовании равен коэффициенту полезной энергии при резании единичным зерном.

Следовательно, при шлифовании трение стружки и шлама об обрабатываемую поверхность не играет такой существенной роли, как при суперфинишировании, и этим эффектом можно пренебречь.

Скорость одновременного объемного разрушения материала найдем по аналогии с процессом суперфиниширования:

$$V_t = 0,074 \cdot \frac{P_z \cdot v \cdot \varphi}{\tau \cdot (1 + 1,5 \cdot f_z (1 + \xi))} = 0,074 \cdot \frac{8 \cdot 50 \cdot 0,57}{1340 \cdot 10^6 \cdot (1 + 1,5 \cdot 0,2 \cdot (1 + 1,5))} = 7 \cdot 10^{-9} \text{ м}^3/\text{с}$$

Единовременная глубина шлифования:

$$a_t = \frac{V_t}{v \cdot l} = \frac{7 \cdot 10^{-9} \cdot 60}{150 \cdot 10 \cdot 10^{-3}} = 0,28 \cdot 10^{-6} \text{ м}.$$

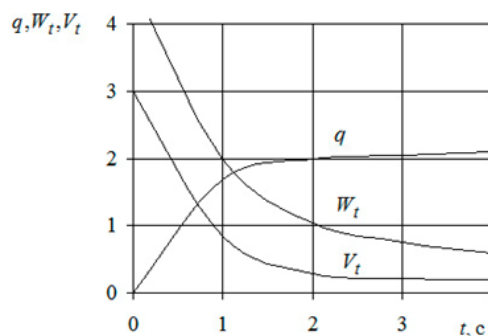


Рисунок 1. Влияние времени t суперфиниширования на съём припуска $q(t)$ (мкм), эффективную мощность суперфиниширования $W_t \cdot 10^{-1}$ (Вт) и скорость формообразования единовременного объема V_t (мм³/с) при зернистости инструмента М7

Из сравнения с результатами, приведенными на рис.1, видно, что в начальный момент суперфиниширования значение параметра V_t примерно равно расчетному значению при шлифовании, но после 5 секунд при суперфинишировании значение этого

параметра снижается в несколько раз. Это говорит о том, что при суперфинишировании за счет больших размеров площадки контакта в резании участвует значительное число абразивных зерен и они в начальный момент оставляют на поверхности заготовки глубокие риски, соизмеримые с рисками от зерен при чистовым тонком шлифовании. Однако в силу специфики процесса суперфиниширования абразивные бруски быстро затупляются и абразивные зерна оставляют на поверхности заготовки мелкие риски, что способствует уменьшению шероховатости обработанной поверхности. При чистовом шлифовании такого эффекта добиться трудно.

На наш взгляд, эффективность чистового шлифования можно существенно повысить, если осуществлять его при пониженной окружной скорости вращения шлифовального круга, что обеспечит снижение температуры в зоне резания и тем самым повысит качество поверхностного слоя заготовки и увеличит степень засаливания рабочей поверхности инструмента, что снизит шероховатость шлифованной поверхности. В наиболее полной мере все преимущества предварительного и чистового шлифования реализуются в способе шлифования-доводки качающимся кругом [2], апробированном на СПЗ (г. Саратов РФ).

Таким образом, чистовое шлифование в том виде, как оно сейчас повсеместно применяется, отличается от суперфиниширования возможностью сохранения во времени высокой режущей способности, что является решающим фактором обеспечения высокой производительности снятия припуска. Однако при чистовом шлифовании трудно добиться высокого качества обработанной поверхности из-за наличия глубоких царапин на поверхности заготовки и из-за высокой скорости резания, которая вызывает опасность возникновения дефектного поверхностного слоя заготовки.

Из выполненного анализа следует, что поиск дальнейшего повышения эффективности чистовой обработки деталей следует осуществлять в направлении использования высокопроизводительных методов обработки, обеспечивающих одновременно высокое качество обработанной поверхности. Такие методы должны иметь высокое значение коэффициента полезной энергии и низкое значение скорости единовременного объемного разрушения материала. Одним из таких методов, на наш взгляд, является процесс электрохимической обработки (ЭХО). Покажем это на примере расчета энергетических критериев эффективности.

Как известно, мощность электрохимической обработки равна произведению тока на напряжение [8]:

$$W = I \cdot U, \quad (1)$$

где I - сила тока;

U - электрическое напряжение.

Масса растворенного при электролизе вещества определяется объединенным законом электролиза, сформулированным М. Фарадеем:

$$M = k \cdot I_a \cdot t, \quad (2)$$

где M - масса вещества, растворенного на электроде;

k - электрохимический эквивалент вещества;

t - время электролиза;

I_a - сила тока, затраченная на растворение металла.

При выполнении ЭХО, как правило, часть электрического тока, протекающего через межэлектродный промежуток по электродам, затрачивается на выделение кислорода на аноде, водорода на катоде и на разрушение окисных пленок, образующихся на аноде. В связи с этим фактическая масса растворенного металла при прохождении че-

рез межэлектродный зазор определенного количества электричества всегда меньше массы, которую предполагалось снять на основании закона Фарадея. Эта разница оценивается коэффициентом выхода металла по току, иначе коэффициентом полезной технологической работы:

$$\varphi = \frac{I_a}{I}. \quad (3)$$

С учетом приведенного соотношения (3) выражение (2) примет вид:

$$M = k \cdot I \cdot t \cdot \varphi. \quad (4)$$

Для практических целей съем металла удобнее оценивать не в массовых, а в объемных или линейных единицах. В связи с этим для расчетов технологических параметров электрохимической обработки удобнее пользоваться значением объемного электрохимического эквивалента K_y , определяемого по формуле:

$$K_y = \frac{k}{\rho_M}, \quad (5.5)$$

где ρ_M - плотность материала заготовки.

С учетом уравнений (4) и (5) объем растворенного при ЭХО металла можно определить по формуле:

$$V = K_y \cdot I \cdot t \cdot \varphi, \quad (6)$$

где t - время обработки.

По закону Ома ток прямо пропорционален напряжению:

$$I_a = \frac{U_e}{\rho_e}, \quad (7)$$

где U_e - эффективное напряжение на электродах;

ρ_e - удельное сопротивление электролита, равное:

$$\rho_e = (F \cdot \alpha \cdot C \cdot [\mu_+ + \mu_-])^{-1},$$

где C - эквивалентная концентрация электролита ($C = k_+ Z_+ n_0 / N_A$);

n_0 - концентрация молекул электролита, из которых αn_0 диссоциированы на ионы;

α - коэффициент диссоциации.

k_+ - число положительных ионов после диссоциации молекулы;

Z_+ - валентность иона;

N_A - постоянная Авогадро;

F - постоянная Фарадея ($F \approx 96500$ Кл/моль);

μ_+, μ_- - положительные величины, называемые подвижностями ионов.

Величина $\sigma = \frac{1}{\rho_e}$ называется электропроводностью электролита.

С повышением температуры раствора электролита его удельное электрическое сопротивление уменьшается, т.к. увеличивается α , во-вторых, уменьшается вязкость раствора, и соответственно возрастают подвижности ионов μ_+, μ_- .

От концентрации раствора удельное сопротивление зависит более сложно.

Выражение (7) удобнее представить в следующем виде:

$$I_a = \chi_e \cdot U_e \cdot S_i / \delta_i, \quad (8)$$

где δ_i - величина межэлектродного зазора;

χ_e - эффективная удельная электропроводность электролита;

S_i - площадь рабочей поверхности инструмента.

В свою очередь, эффективное напряжение не равно приложенному напряжению. Для протекания в электролите постоянного тока нужно, чтобы на носители тока действовали, помимо кулоновских сил (как в электростатическом поле), еще какие-то, неэлектростатические, силы, называемые сторонними силами. Поэтому под напряжением электролиза понимается физическая величина U , численно равная суммарной работе, совершаемой кулоновскими силами и сторонними силами при перемещении положительного заряда:

$$U = U_e + \Delta_\varphi, \quad (9)$$

где Δ_φ - сумма электродных потенциалов.

Подставляя равенства (8) и (9) в выражение (6), найдем:

$$V = K_y \cdot \chi_e \cdot S_i \frac{U \cdot t}{\delta_i} \cdot \varphi. \quad (10)$$

На основе выражений (3), (8) и (9) найдем также и эффективную мощность ЭХО:

$$W_t = \frac{\chi_e \cdot S_i}{\delta_i} \cdot U^2 \cdot \varphi. \quad (11)$$

На основе тех же выражений коэффициент полезной энергии при электрохимической обработке:

$$\varphi = 1 - \frac{\Delta_\varphi}{U}. \quad (12)$$

Как видно из выражений (10), (11) и (12), эффективность процесса электрохимической обработки во многом зависит от условий его протекания: от свойств электролита, величины межэлектродного зазора, от напряжения источника тока, от площади рабочей поверхности электрод-инструмента и т.д.

Удельная энергия насыщения материала при электрохимической обработке:

$$E_0 = \frac{U \cdot \varphi}{K_y}. \quad (13)$$

Скорость единовременного объемного разрушения материала при ЭХО равна:

$$V_t = \frac{W_\varphi}{E_0} = I \cdot K_y = \frac{\chi_e \cdot S_i \cdot U}{\delta_i} \cdot K_y. \quad (14)$$

Из выражения (14) видно, что скорость объемного разрушения материала заготовки при электрохимической обработке зависит от диаметра заготовки и высоты (толщины) электрод-инструмента, что не дает сделать однозначный вывод о качестве поверхности при ЭХО. Сравнить эффективность ЭХО с эффективностью процесса шлифования и суперфиниширования можно по критерию линейного единовременного разрушения материала, значение которого получается делением равенства (14) на площадь единовременного разрушения обрабатываемой поверхности, равную:

$$S_t = v \cdot l_i = \pi \cdot d \cdot n_i \cdot l_z, \quad (15)$$

где n_i - частота вращения заготовки;

d - диаметр заготовки;

l_z - длина профиля заготовки.

Тогда глубина одновременного разрушения материала:

$$a_t = \frac{V_t}{S_t} = \frac{I \cdot K_y}{\pi \cdot d \cdot n_i \cdot l_z} \quad (16)$$

По аналогии, взяв отношение объема снимаемого припуска (10) к площади поверхности заготовки, найдем линейный съем металла:

$$q(t) = \frac{2 \cdot I \cdot K_y}{\pi \cdot d \cdot l_z} \cdot t \quad (17)$$

Приведем численный пример. Пусть обработке подвергаются внутренние кольца шарикоподшипников серии 202 из закаленной стали ШХ15 в среде электролита NaNO_3 8% концентрации под напряжением 12 В. Сила тока составляет 15 А. Диаметр заготовки $d = 40$ мм, частота вращения $n_i = 3000$ об./мин., длина профиля $l = 10$ мм. Плотность материала заготовки $\rho_m = 7,8 \cdot 10^{-6}$ кг/мм³, электрохимический эквивалент вещества $k = 2,8 \cdot 10^{-6}$ кг/А·с., $K_y = 0,36$ мм³/А·с., $\varphi = 0,9$.

Съем металла на диаметр заготовки в течение 10 с составил 70 мкм. Средняя величина электрического тока в процессе обработки – 15,6 А.

В таком случае мощность электрохимической обработки:

$$W = 15 \cdot 12 = 180 \text{ Вт.}$$

Как видно, мощность электрохимической обработки примерно вдвое меньше мощности чистового шлифования (табл. 5.1).

Для принятых условий электрохимической обработки на основании выражения (16) имеем:

$$a_t = \frac{15 \cdot 0,36 \cdot 60}{3,14 \cdot 40 \cdot 3000 \cdot 10} = 8,6 \cdot 10^{-5} \text{ мм.}$$

По этому показателю процесс электрохимической обработки существенно превосходит процесс шлифования, для которого $a_t = 0,28$ мкм. Но, правда, при анализе процесса шлифования мы не учитывали процесс выхаживания, при котором величина a_t будет уменьшаться. Однако, если учитывать процесс выхаживания, то производительность процесса резко упадет и окажется несопоставимой с ЭХО.

При суперфинишировании

$$a_t = \frac{V_t}{v \cdot l} = 0,074 \cdot \frac{P_z \cdot f_t \cdot \varphi}{\tau \cdot (1 + 1,5 \cdot f_z \cdot (1 + \xi)) \cdot l}$$

Для принятых условий суперфиниширования и $t = 1$ с

$$a_t = 0,074 \cdot \frac{8 \cdot 0,25 \cdot 0,25}{1340 \cdot (1 + 1,5 \cdot 0,2 \cdot (1 + 1,5)) \cdot 10} = 1 \cdot 10^{-5} \text{ мм.}$$

Таким образом, качество обработанной поверхности, оцениваемое по параметру a_t , при суперфинишировании в несколько раз выше, чем при ЭХО, и более чем на порядок выше, чем при шлифовании.

Для условий предыдущих примеров на рис. 5.1 приведены зависимости съема металла для чистового шлифования, суперфиниширования и электрохимической обработки.

Величину образуемых микронеровностей определяли делением величины a_t на 1,75. Величину диаметрального съема при суперфинишировании определяли делением объема снятого припуска V_s на площадь обрабатываемой поверхности $F = \pi \cdot d \cdot l$.

Как видно из рис.2, при шлифовании съем металла выше, чем при ЭХО. Однако, в сумме ЭХО и суперфиниширование обеспечивают не меньший съем, чем при шлифовании.

Если учесть, что при шлифовании на процесс выхаживания затрачивается дополнительное время и, что при шлифовании единовременная глубина обработки намного выше, чем при суперфинишировании, то становится очевидной повышенная эффективность совмещенного процесса ЭХО и суперфиниширования.

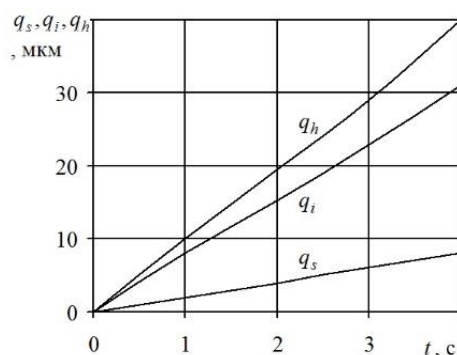


Рисунок 2. Зависимость съема металла от времени t при шлифовании $q_h(t)$, суперфинишировании $q_s(t)$ и ЭХО $q_i(t)$

Из выполненного анализа следует, что с целью обеспечения высокой величины съема металла операцию чистовой обработки деталей типа колец подшипников следует осуществлять методом электрохимической обработки, совмещенной с суперфинишированием мелкозернистым абразивным инструментом.

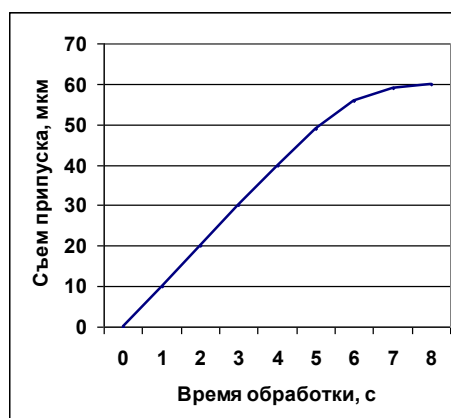


Рисунок 3. Зависимость съема припуска q от времени t обработки при совмещенном процессе ЭХО и суперфиниширования.

Модель такой обработки построена из приведенных выше зависимостей, полученные результаты изображены на рис. 3.

Первые шесть секунд идет совмещенный процесс электрохимической обработки и суперфиниширования. Поэтому все показатели процесса соответствуют тем, что приведены на рис.2. На шестой секунде в контакте с заготовкой находится только абразивный инструмент зернистости М7, а процесс ЭХО прекращается. Поэтому все показатели процесса в последние четыре секунды определяются суперфинишированием.

Таким образом, в короткое время - в течение всего 8 секунд - обеспечивается снятие припуска в объеме 60 мкм (что обычно оставляется на операцию чистового шлифования) и высокое качество поверхности, характерное для суперфиниширования.

Сделанные выводы подтверждаются результатами экспериментальных исследований.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Королев, А. В. Теоретико-вероятностные основы совершенствования процессов абразивной обработки путем управления состоянием инструмента и его механическим взаимодействием с деталью: дис. ... д-ра. техн. наук: 05.02.08. – Саратов, 1977. – 348 с.

2. Давиденко, О. Ю. Теоретические основы технологического обеспечения повышенных показателей качества деталей опор качения на операциях многобрусковой обработки: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.02.98. – Саратов, 1997. – 32 с.

3. Шилакадзе, В. А. Планирование эксперимента при суперфинишировании колец роликоподшипников / В. А. Шилакадзе // Подшипниковая промышленность. – 1981. – № 1. – С. 4-9.

4. Евсеев, Д. Г. Формирование свойств поверхностных слоев при абразивной обработке / Д. Г. Евсеев. – Саратов: Сарат. гос. ун-т, 1975. – 127 с.

5. Корчак С. Н. Производительность процесса шлифования стальных деталей / С. Н. Корчак – М.: Машиностроение, 1974. - 280 с.

6. Редько, С. Г. Процессы теплообразования при шлифовании металлов / С. Г. Редько – Саратов: Сарат. гос. ун-т, 1962. – 231 с.

7. Физические основы процесса резания металлов / под ред. В. А. Остафьева. – Киев: Вища школа, 1976. – 136 с.

8. Режимы резания. Справочник: – М.: НИИТавтопром, 1995. – 456 с.

Поступила в редколлегию 01.02.2023 г.

УДК 621.838.222

М. П. Шишкарев, д-р техн. наук, проф.

Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, РФ

Тел.: 8 (908)-193-33-93; E-mail: shishkarev_m_p@mail.ru**ТЕХНИКО-ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ БАЗОВОГО ВАРИАНТА АДАПТИВНОЙ ФРИКЦИОННОЙ МУФТЫ ВТОРОГО ПОКОЛЕНИЯ**

В статье приведены результаты исследования номинальной нагрузочной способности адаптивной фрикционной муфты второго поколения базового варианта. Показано, что адаптивная фрикционная муфта второго поколения (базовый вариант) может передавать более высокую, чем предохранительная фрикционная муфта обычной точности срабатывания, нагрузку при одинаковом числе пар трения. При увеличении коэффициента усиления муфты со всеми ведущими парами трения уменьшается предельное число пар трения основной фрикционной группы, при котором муфта обладает более высокой нагрузочной способностью по сравнению с предохранительной фрикционной муфтой обычной точности срабатывания.

Ключевые слова: адаптивная фрикционная муфта, вращающий момент, коэффициент трения, коэффициент усиления, нагрузочная способность, поколение, фрикционная группа.

M. P. Shishkarev**OPERATIONAL CHARACTERISTICS OF THE BASIC VERSION ADAPTIVE FRICTION CLUTCH OF THE SECOND GENERATION**

The article presents the results of a study of the rated load capacity of the basic version of the adaptive friction clutch of the second generation. It is shown that the adaptive friction clutch of the second generation (the basic version) can transmit a load higher than the safety friction clutch of the usual actuation accuracy with the same number of friction pairs. With an increase in the coupling gain with all leading friction pairs, the limiting number of friction pairs of the main friction group decreases, at which the coupling has a higher load capacity compared to the safety friction clutch of the usual actuation accuracy.

Keywords: adaptive friction clutch, torque, friction coefficient, gain, load capacity, generation, friction group.

1. Введение. Адаптивные фрикционные муфты (АФМ) применяются на практике как устройства, предохраняющие узлы и детали машин от чрезмерных перегрузок вращающим моментом [1]. Повышенная стабильность предельного вращающего момента, ограничиваемого АФМ, позволяет не только надежно защищать от поломок элементы приводов машин, но и оптимизировать их массогабаритные параметры [2]. Благодаря этому использование АФМ создает определенные преимущества при защите деталей и узлов от разрушения и при экономии средств, затрачиваемых на изготовление машин.

Повышенная стабильность нагрузки, передаваемой АФМ, достигается за счет введения в ее конструкцию управляющего устройства (УУ) обратной связи, благодаря которому нестабильность коэффициента трения компенсируется при перегрузках посредством автоматического изменения усилия прижатия друг к другу пар трения [3].

Действие отжимной силы на пары трения уменьшает нагрузку, передаваемую АФМ, поэтому для обеспечения необходимой нагрузочной способности муфты требуется увеличение либо силы натяжения замыкающей пружины (группы замыкающих пружин), либо числа пар трения, либо их радиальных габаритных размеров. В любом из перечисленных случаев происходит увеличение габаритных размеров и массы АФМ.

АФМ второго поколения (базовый вариант) отличается от АФМ первого поколения (типа муфты Н.Д. Вернера [4]) введением в конструкцию дополнительной фрикционной группы, которая не охвачена обратной связью [5]. Основная фрикционная группа, как и в АФМ первого поколения, охвачена обратной отрицательной связью и не

претерпела каких-либо изменений.

Вследствие наличия в конструкции АФМ второго поколения (базовый вариант) фрикционной группы, не охваченной обратной связью, нагрузочная способность муфты выше, чем АФМ первого поколения. Точность срабатывания АФМ второго поколения (базовый вариант) также выше, чем точность срабатывания АФМ первого поколения, поскольку значение отжимной (распорной) силы, действующей на пары трения и отнесенной к единице изменения величины коэффициента трения, выше, чем у АФМ первого поколения.

Цель исследования. Оценка номинальной нагрузочной способности базового варианта АФМ второго поколения.

Задачи исследования. 1. Постановка условия более высокой номинальной нагрузочной способности АФМ второго поколения (базовый вариант) по сравнению с предохранительной фрикционной муфтой обычной точности срабатывания [4]. 2. Исследование влияния числа пар трения основной фрикционной группы (ОФГ) на соотношение номинальной нагрузочной способности АФМ второго поколения (базовый вариант) и предохранительной фрикционной муфты обычной точности срабатывания. 3. Исследование влияния компоновочной схемы ОФГ АФМ второго поколения (базовый вариант) на номинальную нагрузочную способность.

2. Основное содержание и результаты работы

Вполне естественно, что сравнение нагрузочной способности АФМ второго поколения (базовый вариант) и предохранительной фрикционной муфты, обладающей обычной точностью срабатывания, необходимо производить при одинаковом числе пар трения фрикционных групп.

Под предохранительной фрикционной муфтой с обычной точностью срабатывания будем понимать муфту без устройства обратной связи, в которой предельное значение вращающего момента прямо пропорционально величине коэффициента трения.

В АФМ второго поколения (базовый вариант) в качестве пар трения, упомянутых выше, будем считать пары трения основной фрикционной группы.

Рассмотрим принципиальную схему АФМ второго поколения (базовый вариант), которая показана на рис. 1. Муфта состоит из полумуфт 1 и 2, которые связаны между собой двумя пакетами фрикционных дисков: диски 3 и 4 образуют основную фрикционную группу (ОФГ), а нажимной диск 5 и диск трения 6 – дополнительную фрикционную группу (ДФГ).

В варианте АФМ, показанном на рис. 1, ОФГ выполнена по схеме дифференциации пар трения типа «ведущие пары – ведомые пары» [6]. Это реализовано в схеме благодаря тому, что упорный диск 7, жестко закрепленный на ступице полумуфты 1, непосредственно передает нагрузку на смежный с ним диск 4, кото-

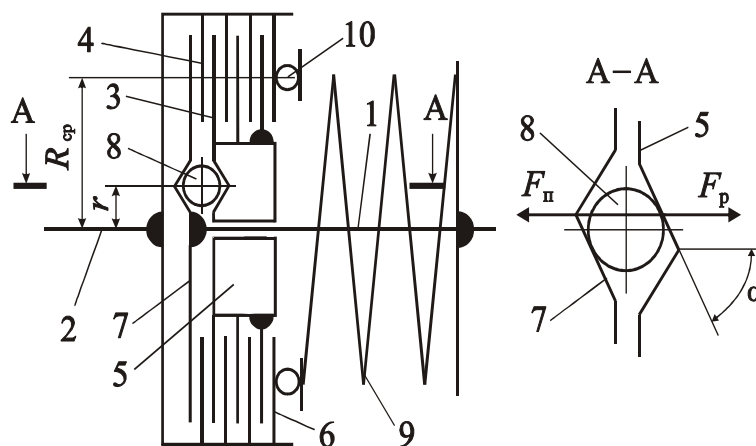


Рисунок 1. Принципиальная схема АФМ второго поколения (базовый вариант).

рый связан с барабаном полумуфты 2. Остальная часть нагрузки в ОФГ передается дисками 3, связанными со ступицей нажимного диска 5, на диски 4.

Нажимной диск 5 лишен непосредственной кинематической связи в окружном направлении со ступицей полумуфты 1. Передача вращающего момента от полумуфты 1 на нажимной диск осуществляется посредством тел качения 8, расположенных в гнездах с наклонными боковыми стенками (рис. 1, сечение А-А). Гнезда выполнены на взаимно-обращенных торцевых поверхностях нажимного и упорного дисков.

Силовое замыкание дисков трения ОФГ и ДФГ осуществляется при помощи пружины 9, поставленной в муфту с предварительным натяжением. Усилие пружины на фрикционные диски передается через упорный подшипник 10.

Формула для вычисления предельного вращающего момента (момента срабатывания) АФМ имеет следующий вид [5]:

$$T_{\text{п}} = F_{\text{п}} R_{\text{ср}} f \frac{z+1-Cf}{1+(z-1)Cf}, \quad (1)$$

где $F_{\text{п}}$ – сила натяжения пружины 9; $R_{\text{ср}}$ – средний радиус поверхностей трения дисков ОФГ и ДФГ; f – коэффициент трения между фрикционными дисками ОФГ и ДФГ; z – число пар трения ОФГ; C – коэффициент усиления (КУ) обратной связи:

$$C = \frac{R_{\text{ср}}}{r} \operatorname{tg} \alpha,$$

α – угол скоса боковой стенки гнезда под тело качения 8 (см. рис. 1, сечение А-А); r – радиус окружности, на которой расположены тела качения 8.

Согласно рекомендациям, изложенным в работе [5], по условию достижения наибольшей точности срабатывания число пар трения ДФГ в формуле (1) принято равным единице.

Значение предельного вращающего момента предохранительной фрикционной муфты обычной точности срабатывания вычисляется по формуле [4]:

$$T_{\text{п1}} = z_1 F_{\text{п}} R_{\text{ср}} f, \quad (2)$$

где z_1 – число пар трения фрикционной группы муфты.

Согласно принятому выше условию должно выполняться условие $z = z_1$. Значения остальных параметров сравниваемых объектов приняты одинаковыми.

Подставляя в предполагаемое неравенство $T_{\text{п}} > T_{\text{п1}}$ правые части равенств (1) и (2) и решая неравенство

$$-Cfz^2 + Cfz + (1 - Cf) > 0, \quad (3)$$

относительно неизвестного z , находим следующие корни эквивалентного квадратного уравнения:

$$z_{1,2} = \frac{-1 \pm \sqrt{4/(Cf) - 3}}{-2}. \quad (4)$$

Для нахождения решений, удовлетворяющих неравенству (3), исследуем дискриминант в корнях (4). Для этого примем в качестве коэффициента трения его минимальное значение f_{min} , которое соответствует номинальному вращающему моменту АФМ и предохранительной фрикционной муфты обычной точности срабатывания [7]. Другие значения коэффициента трения не будут приняты во внимание, поскольку они

соответствуют режиму перегрузки муфт.

Исследуем возможность выполнения следующего условия:

$$\frac{4}{Cf_{\min}} - 3 \geq 0. \quad (5)$$

Для оценки возможности выполнения условия (5) зададим дополнительное условие, которое заключается в необходимости ограничения значений КУ C в соответствии с принятой конструктивно-компоновочной схемой АФМ. Указанное ограничение имеет следующий вид [5]:

$$C \leq \frac{1}{f_{\max}}, \quad (6)$$

где f_{\max} – максимальный коэффициент трения.

Подставив правую часть соотношения (6) (при условии равенства) в формулу (5), получаем:

$$4 \geq 3 \frac{f_{\min}}{f_{\max}}. \quad (7)$$

Соотношение (7) выполняется даже в форме неравенства, поскольку справедливо неравенство $f_{\min} < f_{\max}$. Следовательно, при выполнении условия (6) дискриминант в формуле (4) положителен. Соответственно этому множество решений, удовлетворяющих неравенству (3), принадлежит следующему интервалу:

$$z \in \left(\frac{-1 + \sqrt{4/(Cf - 3)}}{-2}; \frac{-1 - \sqrt{4/(Cf - 3)}}{-2} \right). \quad (8)$$

В выражении (8) левая часть в скобках отрицательная, поскольку при указанном выше ограничении значения КУ справедливо следующее неравенство:

$$\frac{4}{Cf - 3} > 1.$$

Следовательно, нижняя граница интервала значений z равна нулю.

Верхняя граница интервала зависит от значений f_{\min} и C , т. е. от значения коэффициента трения f_{\max} .

Обозначим

$$\frac{f_{\max}}{f_{\min}} = m,$$

где m – относительная ширина интервала изменения коэффициента трения.

С учетом введенного обозначения верхнее граничное значение интервала запишем как

$$z_{\max} = \frac{1 + \sqrt{4m - 3}}{2}. \quad (9)$$

График зависимости (9) показан на рис. 2 (кривая 1). При построении графика принято $f_{\min} = 0,1$. В скобках на графике указаны значения КУ C , соответствующие значениям m и вычисленные по формуле (6) (в форме равенства).

График показывает, что с увеличением ширины интервала значений коэффициента трения увеличивается и параметр z_{max} . Это означает, что при $z \leq z_{max}$ АФМ второго поколения (базовый вариант) обладает большей нагрузочной способностью, чем предохранительная фрикционная муфта обычной точности срабатывания, имеющая такое же число фрикционных пар, что ОФГ исследуемой АФМ.

Наоборот, при $z > z_{max}$ АФМ второго поколения (базовый вариант) может передавать меньший, чем предохранительная фрикционная муфта обычной точности срабатывания, предельный вращающий момент.

Рассмотрим случай, когда АФМ второго поколения (базовый вариант) и предохранительная фрикционная муфта обычной точности срабатывания работают при повышенном (по сравнению со значением f_{min}) коэффициенте трения. В данном случае значение коэффициента относительной ширины интервала m становится меньше, чем его исходное значение f_{min} , что, вероятно, повлияет на значение параметра z_{max} .

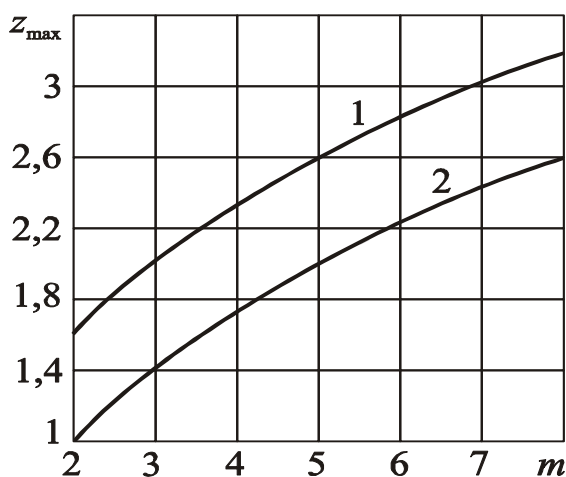


Рисунок 2. Зависимости максимального числа пар трения ОФГ от коэффициента m

(кривая 1). В скобках по оси абсцисс отложены значения коэффициента трения, при которых происходит срабатывание муфты.

График показывает, что при всех значениях коэффициента трения, превышающих f_{min} , нагрузочная способность АФМ второго поколения (базовый вариант) выше, чем предохранительной фрикционной муфты обычной точности срабатывания, если число пар трения ОФГ не превышает значения, отмеченного кривой 1 на рис. 3.

График также показывает, что с уменьшением m , т. е. с увеличением коэффициента трения, при котором происходит срабатывание АФМ, требуется меньшее число пар трения ОФГ для того чтобы ее нагрузочная способность была больше, чем предохранительной фрикционной муфты обычной точности срабатывания при тех же условиях.

Если срабатывание муфты происходит при максимальном значении коэффициента трения, то АФМ второго поколения (базовый вариант) должна иметь только одну пару трения ОФГ для того чтобы ее нагрузочная способность была выше, чем предо-

График зависимости $z_{max}(m)$ для указанного случая приведен на рис. 3

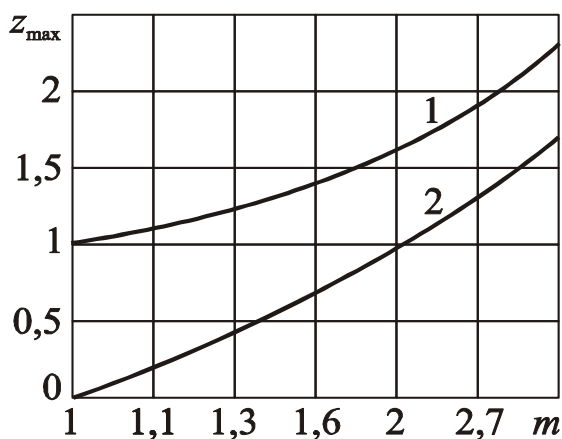


Рисунок 3. Зависимости максимального числа пар трения ОФГ от коэффициента m при повышенном коэффициенте трения

хранительной фрикционной муфты обычной точности срабатывания.

Если конструктивно-компоновочная схема АФМ второго поколения (базовый вариант) построена по типу «все пары трения ведущие», то формула для определения предельного вращающего момента имеет следующий вид:

$$T_n = F_n R_{cp} f \frac{z+1-Cf}{1+zCf}. \quad (10)$$

Поставив условие, аналогичное указанному выше, и учитывая соотношение (10), получаем следующее неравенство:

$$z^2 Cf < 1 - Cf. \quad (11)$$

Неравенство (11) выполняется при следующих значениях z_{max} :

$$z_{max} < \sqrt{\frac{1}{Cf_{min}} - 1},$$

или, с учетом ограничения максимального значения КУ,

$$z_{max} < \sqrt{m-1}. \quad (12)$$

График зависимости $z_{max}(m)$, построенный с использованием формулы (12), показан на рис. 2 кривой 2.

Сопоставление кривых 1 и 2 на рис. 2 показывает, что АФМ со всеми ведущими парами трения ОФГ должна иметь более жесткие ограничения максимального числа пар трения данной фрикционной группы для обеспечения более высокой нагрузочной способности по отношению к предохранительной фрикционной муфте обычной точности срабатывания.

Что касается соотношения нагрузочной способности АФМ со всеми ведущими парами трения ОФГ и предохранительной фрикционной муфты обычной точности срабатывания при значении коэффициента трения, отличающимся от значения f_{min} , соответствующий график показан на рис. 3 (кривая 2).

Данный график показывает следующее:

– ограничение максимального числа пар трения ОФГ у АФМ со всеми ведущими парами трения более жесткие, чем у АФМ с дифференцированными парами трения (кривая 1), при всех значениях коэффициента трения;

– начиная со значения коэффициента трения $f=0,4$, АФМ со всеми ведущими парами трения ОФГ не имеет преимуществ по нагрузочной способности по отношению к предохранительной фрикционной муфте обычной точности срабатывания.

Теоретическое обоснование полученных результатов

С уменьшением КУ C (см. рис. 2) уменьшается и распорная сила, возникающая между телами качения 8 и нажимным диском 5 (рис. 1). При увеличении коэффициента трения это резко повышает силу трения между фрикционными дисками ОФГ и ее

нагрузочную способность.

Доля вращающего момента, приходящаяся на каждую пару трения ОФГ, также возрастает, поэтому увеличивается и отношение величины нагрузки, передаваемой одной парой трения, к нагрузке пары трения «нажимной диск 5 – диск трения 6».

Последняя из упомянутых пар трения эквивалентна по величине передаваемой нагрузки паре трения в предохранительной фрикционной муфте обычной точности срабатывания, следовательно, может быть увеличено число пар трения ОФГ, связанных с нажимным диском 5, и общее число пар трения ОФГ при величине распорной (отжимной) силы устройства обратной связи, обеспечивающей более высокую нагрузочную способность АФМ второго поколения (базовый вариант) [11].

Если АФМ выполнена со всеми ведущими парами трения ОФГ, распорная (отжимная) сила будет больше, чем в варианте муфты с дифференцированными парами трения ОФГ, следовательно, нагрузочная способность пар трения ОФГ снижается. В этом случае уменьшается и предельное число пар трения ОФГ (по отношению к АФМ с дифференцированными парами трения ОФГ), за счет которых данный вариант АФМ способен передавать нагрузку, более высокую, чем нагрузка предохранительной фрикционной муфты обычной точности срабатывания (рис. 2, кривая 2).

При увеличении коэффициента трения предельный вращающий момент АФМ увеличивается согласно соотношениям (1) и (10). Следовательно, возрастает и распорная (отжимная) сила УУ, что приводит к ограничению передаваемой нагрузки, которую без буксования может передавать каждая пара трения ОФГ [12].

В предохранительной фрикционной муфте обычной точности срабатывания распорная сила отсутствует, поэтому ограничение передаваемой нагрузки связано только с числом пар трения и значением коэффициента трения.

По отношению к АФМ с дифференцированными парами трения ОФГ ограничение числа пар трения указанной фрикционной группы в АФМ со всеми ведущими парами трения при увеличении коэффициента трения носит тот же характер. Разница заключается в том, что при значениях $f \geq 0,4$ муфта не имеет преимуществ по отношению к предохранительной фрикционной муфте обычной точности срабатывания с точки зрения нагрузочной способности. Это представляется положительным обстоятельством, поскольку означает меньшие перегрузки при увеличении коэффициента трения.

АФМ второго поколения (базовый вариант) может иметь значение КУ C , меньшее, чем значение отношения $1/f_{\max}$. В формулах (9) и (12) это означает более высокое значение коэффициента m и, как следствие, увеличение предельного значения параметра z_{\max} . Это объясняется уменьшением распорной силы и соответствующим увеличением нагрузочной способности пар трения ОФГ. Однако в данном случае уменьшается точность срабатывания АФМ.

Обсуждение и результаты.

Установлена возможность АФМ второго поколения (базовый вариант) передавать более высокую, чем предохранительная фрикционная муфта обычной точности срабатывания, нагрузку при одинаковом числе пар трения последней и ОФГ.

Результаты исследования показали, что более высокая нагрузочная способность АФМ второго поколения (базовый вариант) со всеми ведущими парами трения ОФГ, по сравнению с предохранительной фрикционной муфтой обычной точности срабатывания, может быть достигнута при увеличении коэффициента трения до определенного значения и при более жестких ограничениях числа пар трения ОФГ.

Увеличение КУ АФМ второго поколения (базовый вариант) со всеми ведущими парами трения уменьшает предельное число пар трения ОФГ, при котором муфта обладает более высокой нагрузочной способностью по сравнению с предохранительной фрикционной муфтой обычной точности срабатывания.

Результаты исследования могут быть использованы в практике расчета и проектирования, а также при эксплуатации АФМ второго поколения (базовый вариант) в тех случаях, когда при заданной нагрузке, которую должна передавать предохранительная муфта, необходима повышенная точность ограничения нагрузки.

3. Заключение.

1. В отличие от АФМ первого поколения АФМ второго поколения (базовый вариант) может передавать более высокую, чем предохранительная фрикционная муфта обычной точности срабатывания, нагрузку при одинаковом числе пар трения последней и ОФГ АФМ.

2. Увеличение ширины интервала изменения коэффициента трения приводит к увеличению числа пар трения ОФГ АФМ, при котором она обладает более высокой нагрузочной способностью по сравнению с предохранительной фрикционной муфтой обычной точности срабатывания.

3. При числе пар трения ОФГ АФМ, не превышающем определенного установленного значения, ее нагрузочная способность при повышенном значении коэффициента трения больше, чем нагрузочная способность предохранительной фрикционной муфты обычной точности срабатывания.

4. С увеличением коэффициента трения нагрузочная способность АФМ выше, чем нагрузочная способность предохранительной фрикционной муфты обычной точности срабатывания, при меньшем числе пар трения ОФГ.

5. При максимальном коэффициенте трения более высокая нагрузочная способность АФМ, по сравнению с нагрузочной способностью предохранительной фрикционной муфты обычной точности срабатывания, достигается только при одной паре трения ОФГ.

6. Для достижения более высокой нагрузочной способности, по сравнению с предохранительной фрикционной муфтой обычной точности срабатывания, АФМ второго поколения (базовый вариант) со всеми ведущими парами трения ОФГ должна иметь более жесткие, чем АФМ с дифференцированными парами трения, ограничения по числу пар трения ОФГ.

7. При увеличении коэффициента трения до определенного значения АФМ второго поколения (базовый вариант) со всеми ведущими парами трения ОФГ не имеет преимуществ по нагрузочной способности по отношению к предохранительной фрикционной муфте обычной точности срабатывания.

8. При увеличении КУ АФМ со всеми ведущими парами трения уменьшается предельное число пар трения ОФГ, при котором муфта обладает более высокой нагрузочной способностью по сравнению с предохранительной фрикционной муфтой обычной точности срабатывания.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Шишкарев, М. П. Оптимизация коэффициента усиления адаптивных фрикционных муфт первого поколения с дифференцированными парами трения / М. П. Шишкарев // Тракторы и сельхозмашины. – 2010. – № 4. – С. 36–39.
2. Шишкарев, М. П. Исследование адаптивной фрикционной муфты с комбини-

рованной обратной связью / М. П. Шишкарев, Чан Ван Дык // Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2014. – № 9. – С. 25–32.

3. Шишкарев, М. П. Чан Ван Дык. Анализ точности срабатывания адаптивной фрикционной муфты второго поколения / М. П. Шишкарев, Чан Ван Дык // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2016. – № 5. – С. 33–38.

4. Шишкарев, М. П. Влияние точности срабатывания адаптивных фрикционных муфт на массу привода машины / М. П. Шишкарев // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2008. – № 3. – С. 6–12.

5. Шишкарев, М. П. Чан Ван Дык. Модернизация адаптивной фрикционной муфты второго поколения / М. П. Шишкарев, Чан Ван Дык // Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2014. – № 10. – С. 40–46.

6. Фокин, А. Е. Исследование адаптивной фрикционной муфты с дифференцированными парами трения / А.Е. Фокин, М. Д. Гавриленко, М. П. Шишкарев // Вестник ДГТУ. – 2011. – Т. 11. – № 1 (52). – С. 49–56.

7. Шишкарев, М. П. Оптимальный способ настройки предохранительных фрикционных муфт / М.П. Шишкарев // Вестник машиностроения. – 2006. – № 3. – С. 16–19.

8. Шишкарев, М. П. Улучшение эксплуатационных показателей адаптивных фрикционных муфт / М. П. Шишкарев. – Ростов н/Д.: ГОУ Рост. гос. акад. с-х. машиностроения, 2008. – 148 с.

9. А. с. 1055915 СССР, МПК³ F 16 D 7/02, F 16 D 13/04. Предохранительная фрикционная муфта / М. П. Шишкарев (СССР). – № 3475963/25–27; заявл. 28.07.82; опубл. 23.11.83, Бюл. № 43. – 6 с.: ил.

10. Шишкарев, М. П. Точность срабатывания адаптивной фрикционной муфты с отдельным силовым замыканием / М.П. Шишкарев, А. Ю. Угленко / Вестник ДГТУ. – 2014. – Т. 14. – № 1 (76). – С. 200–203.

11. Шишкарев, М. П. Уровень перегрузки при срабатывании адаптивных фрикционных муфт / М. П. Шишкарев // Тракторы и сельхозмашины. – 2010. – № 2. – С. 42–44.

12. Шишкарев, М. П. Функциональные связи между характеристиками предохранительных фрикционных муфт / М. П. Шишкарев // Вестник машиностроения. – 2006. – № 5. – С. 8–10.

Поступила в редколлегию 31.01.2023 г.

УДК 621.793.71

F. I. Panteleenko, a member- correspondent. NAN B, Ph. D., Professor,
V. A. Okovity, Ph. D., **O. G. Devoino**, Ph. D., Professor, **A. S. Volodko**,
V. A. Sidorov, Ph. D., associate Professor, **V. V. Okovity**, **A. A Litvinko**
Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

Tel. / Fax: +375 17 293-95-99, **E-mail:** niil_svarka@bntu.by

V. M. Astashinsky, a member- correspondent NAS B, D. Phys. - math. n., prof.
A. V. Lykov Institute of Heat and Mass Transfer of the National Academy of Sciences of
Belarus, Minsk, Belarus

Tel. / Fax: +375 17 284-24-91, **E-mail:** ast@hmti.ac.by

INVESTIGATION OF THE IMPACT OF COMPRESSION PLASMA FLOWS ON MULTILAYER COATINGS

The article presents the results of studying the impact of compression plasma flows, which are generated by quasi-stationary plasma accelerators, on multilayer protective coatings obtained using plasma spraying in air. Under shock and wave effects of pulses of the compression plasma flow, plastic deformation and significant compaction of the treated layer of the applied plasma coating occur. Ultrafast cooling and corresponding heat removal to the substrate, after melting of the formed layer with a thickness of about 20-30 microns, is the result of the thermal effect of compression plasma pulses. There are significant structural-phase changes in the modified area. The impact of high-temperature plasma pulses on the "base-coating" system leads to the melting of the resulting coating and the base layer and the subsequent liquid-phase mixing of these components under the influence of the pressure of the plasma flow. The action of plasma flows on the surface of the resulting material leads to significant changes in morphology. The degree of short-term melting in compositions containing various phases affects the number of centers of passing crystallization, leading to strengthening of structures during ultra-rapid cooling.

Keywords: ceramic-metal plasma coatings, compression plasma flows, treatment distance, formed structures, surface layers, formed wear-resistant coatings.

Ф. И. Пантелеенко, В. А. Оковитый, О. Г. Девойно, А. С. Володько, В. А. Сидоров, В. В. Оковитый, А. А. Литвинко, В. М. Асташинский

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ПОТОКОВ КОМПРЕССИОННОЙ ПЛАЗМЫ НА МНОГОСЛОЙНЫЕ ПОКРЫТИЯ

В статье представлены результаты исследования воздействия потоков компрессионной плазмы, генерируемых квазистационарными плазменными ускорителями, на многослойные защитные покрытия, полученные с помощью плазменного напыления на воздухе. При ударно-волновом воздействии импульсов компрессионного плазменного потока происходит пластическая деформация и значительное уплотнение обрабатываемого слоя нанесенного плазменного покрытия. Сверхбыстрое охлаждение и соответствующий отвод тепла к подложке, после расплавления сформированного слоя толщиной порядка 20-30 мкм, является результатом теплового воздействия компрессионных плазменных импульсов. В измененной области наблюдаются значительные структурно-фазовые изменения. Воздействие импульсов высокотемпературной плазмы на систему «основа-покрытие» приводит к расплавлению полученного покрытия и слоя основы и последующему жидкофазному смешению этих компонентов под действием давления плазменного потока. Воздействие потоков плазмы на поверхность полученного материала приводит к существенным изменениям морфологии. Степень кратковременного плавления в композициях, содержащих различные фазы, влияет на количество проходящих центров кристаллизации, приводя к упрочнению структур при сверхбыстром охлаждении.

Ключевые слова: металлокерамические плазменные покрытия, компрессионные плазменные потоки, дистанция обработки, сформованные структуры, поверхностные слои, сформованные износостойкие покрытия.

1. Introduction.

It is known [1–10] that the processing of multilayer plasma coatings by intense high-energy flows: electron, ion, laser, and plasma is accompanied by heating of the treated surface (sometimes above the melting point of the initial material) followed by rapid overcooling of the surface layer of the coating at a rate, reaching values of 10^{10} K/s. The resulting temperature gradients and alloying of the source material during the processing often lead to structural and phase transformations in the surface layers of the deposited materials and, accordingly, to a change in their technological properties: hardness, wear resistance, heat resistance, adhesion strength [1-7]. Completely new opportunities for the ongoing modification of the properties of coatings and a significant improvement in the resulting operational characteristics are provided by the use of compression plasma flows, which are generated by quasi-stationary plasma accelerators [1, 3]. This method has a number of advantages over other methods of high-energy processing: a short exposure time (of the order of ~ 100 μ s), the possibility of additional doping of the resulting coating layers with elements of a pre-applied coating, the use of the gas used not only for heating the coating, but also for its doping. Joint mixing by compression plasma flows of the base-coated system makes it possible to obtain a near-surface layer containing elements of both the coating and the base. The purpose of our research was to study plasma coatings under high-energy exposure to a compressive plasma flow, to study changes in the elemental composition of the coating, structural and phase transformations and technological properties of the modified layer, to create scientific foundations for new methods for significantly improving the properties of plasma wear-resistant coatings, widely used in a number of industries.

2. Technological characteristics of the process of processing by pulses of compression plasma. It is known that under shock and wave impacts of compression plasma flow pulses, plastic deformation and significant compaction of the processed layer of the applied plasma coating occur. Ultrafast cooling and the corresponding heat removal to the substrate, after melting the formed layer with a thickness of about 20-30 microns, is the result of the thermal effect of compression plasma pulses. There are significant structural-phase changes in the modified area. The impact of high-temperature plasma pulses on the "base-coating" system leads to the melting of the resulting coating and the base layer and the subsequent liquid-phase mixing of these components under the influence of the pressure of the plasma flow. The action of plasma flows on the surface of the resulting material leads to significant changes in morphology. The degree of short-term melting in compositions containing various phases affects the number of centers of passing crystallization, leading to strengthening of structures during ultra-rapid cooling. In structures, there is a change in their short-range order, the material in the formed coating comes to a state similar to an amorphous one [1]. The degree of plastic deformation significantly affects the probability of formation of amorphous structures. Accordingly, when $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2\text{-NiCrAlITa}$ and $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2\text{-Mo}$ coatings are exposed to compression plasma flows, the main sign of optimization is the maximum melting at the minimum possible exposure distances with a corresponding increase in the levels of thermal, shock and wave effects of pulses. The possible minimum is limited by the appearance of signs of fault detection of the formed coating (large pores and a network of cracks on the surface, chips). An assessment of the degree of melting and compaction obtained, as well as signs of destruction, is carried out. In the study of thin sections treated with compression plasma, the evaluation of flashing options was carried out on a metallographic microscope (MeF-3) and on analyzers (MOP-AMO3, AutoScan). Together with the study of the properties formed during optimization, we studied the average parameters of microhardness, a characteristic of the formed coatings correlated with the degree of amorphization (microhardness tester "Micromet-II").

Coatings created using a magnetoplasma compressor (MPC) - a gas-discharge quasi-stationary accelerator (Figure 1 a), including an energy unit, a vacuum unit (a chamber with the necessary systems for pumping and puffing the working gas (hydrogen)), a diagnostic complex, a control and measuring a block that synchronizes all units of the installation. Vacuum chamber 150 cm long, at the end there is an MPC discharge device. The working gas supply system allows the use of any gases, as well as their mixture in any ratio. A general view of the discharge device used to create a compression plasma is shown in Figure 1b.

The energy accumulator structurally looks like a complex of a capacitor bank for supplying power to the MPC and capacitor banks that support the operation of the electrodynamic valve, it inlets the working gas. The main advantage of the MPC is the high stability of the compression flow with the possibility of correlation of the control parameters, compositions and flow sizes, the duration of the discharge, which makes it possible to carry out practical applications [2]. The MPC operated in the so-called "residual gas" mode - a previously evacuated vacuum chamber was filled with working gas (nitrogen or hydrogen) to the required pressure (it is possible to operate in the range of 133-1330 Pa). Modes of operation MPC-discharge duration - 140 μs , amplitude indicators of the discharge current - 50 to 100 kA (depending on the initial parameters of the discharge). As a result, a compression plasma flow is formed with indicators - length 10 cm, diameter 1-2 cm (in the region of maximum compression). In accordance with the initial parameters of the accelerator, the plasma velocity of the obtained compression flow is on the order of $(2-7) \cdot 10^6$ cm/s. The resulting concentration of charged particles in the region of maximum compression in this case reaches the order of $(5-10) \cdot 10^{17}$ cm⁻³, and the temperature is 1-3 eV. The treatment of the coatings under study on the samples was carried out when the surface was exposed to one or a series of compression plasma flow pulses, the number of which varied from 10 to 17 in different experiments. bit device MPK, presented in Figure 2.

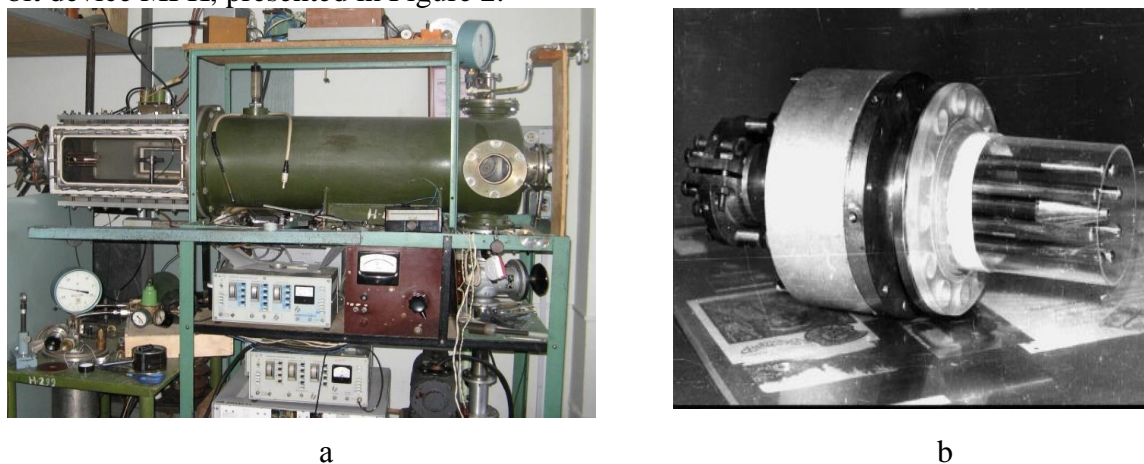


Figure 1. General view of the research stand – magnetoplasma compressor (a); general view of the MPC discharge device (b)

The energy density [8] absorbed by the coated sample varied from 3 to 40 J/cm² per pulse by changing the distance from the cutoff of the discharge device to the sample, as well as by changing the initial voltage on the MPC energy storage. The resulting dependence of the energy density absorbed by the surface, on the distance to the MPC discharge device when operating in a nitrogen atmosphere at parameters $P_0=665$ and 1330 Pa and the initial voltage on the accelerator energy storage device $U_0=3.5$ kV, is shown in Figure 3. The values of the absorbed surface energy density of the target, when the distance from the cathode cutoff to the sample changes from 8 to 16 cm, it decreases by almost 5 times at $P_0=665$ Pa.

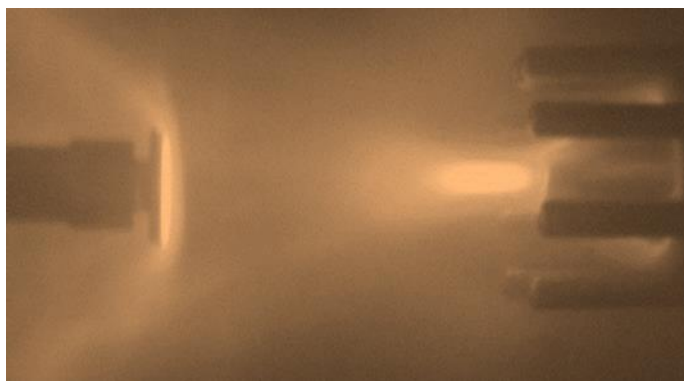


Figure 2. The process of modification under the influence of impulses compressive plasma flow on a sample coated plasma coated

Using the accepted technique, changing the used technological characteristics of the process of processing by pulses of the compression plasma flow, both the distance under the influences and their number were changed [7-11]. The number of pulses significantly affects the thickness of the treated layers. The total number of pulses must create a melted coating with high strength characteristics throughout the entire thickness of the coating. According to the optimization data (Tables 1 and 2), the optimum distances for the formation of hardened structures for NiCrAlITa- Al_2O_3 - TiO_2 are 0.13 m; for Mo- Al_2O_3 - TiO_2 - 0.14 m. This is confirmed by the stabilization of the total porosity, at distances below 0.13 and 0.14 m there is no decrease due to the instantaneous dynamic and thermal effects (about 200 μs), and also the maximum content of the refractory phase, which reduces the degree of melting. At distances below 0.11 m for NiCrAlITa- Al_2O_3 - TiO_2 and 0.12 m for Mo- Al_2O_3 - TiO_2 , defects with the development of macro-cracks are noticeable.

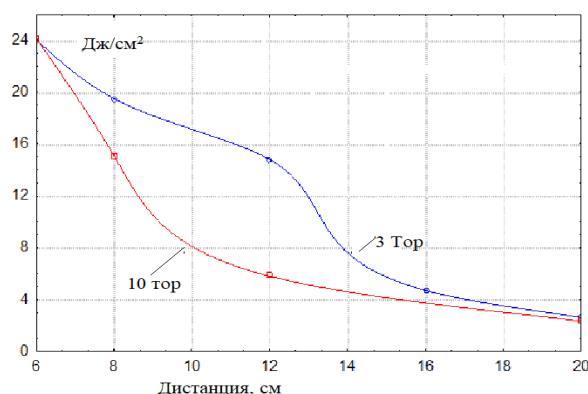


Figure 3. Dependence of the energy density absorbed by the treated surface of the sample on the used distance to the discharge device of the magnetoplasma compressor.

We also optimized the total number of pulses in the compression plasma. When the system is treated with a small amount of pulse, incomplete melting and partial mixing of the system components are observed. Processing with a large number of pulses is characterized by more uniform mixing. An increase in microhardness can also be due to the effects of rapid quenching: the sample experiences sharp heating up to the melting of the surface layer, followed by heat removal into the depth of the sample and rapid recrystallization. It was revealed as a result of research for the complete processing of the formed coatings for NiCrAlITa- Al_2O_3 - TiO_2 , 14-15 impacts are necessary, for Mo- Al_2O_3 - TiO_2 - 12-13. A further increase is

not necessary, the geometry of the created surface of the coating and the technological characteristics of the coating deteriorate due to remelting.

Table 1. Obtained values for optimizing the processing distance compression plasma pulses

| Coating | Distance of treatment with compression plasma pulses, m | Index of obtained porosity, % | Index microhardness, MP |
|---|---|-------------------------------|--------------------------|
| Al ₂ O ₃ -TiO ₂ -Mo | 0,17 | 4,9-6,1 | 5433-7989 |
| | 0,16 | 4,5 – 5,9 | 5948-8074 (4960-6731) |
| | 0,15 | 3,8 – 5,1 | 6349-8565 (5292-7131) |
| | 0,14 | 3,1 – 4,6 | 7240-9380 (6035-7821) |
| | 0,13 | 3,4-4,9 | 6813-8522 (5681-7100) |
| | 0,12 | Destruction coatings | |
| Al ₂ O ₃ -TiO ₂ -NiCrAlITa | 0,17 | 4,5-5,8 | 5775-8644 (4621-6910) |
| | 0,16 | 4,0-5,3 | 6286-9033 (5025-7227) |
| | 0,15 | 3,7 – 4,9 | 7312-9350 (5850-7482) |
| | 0,14 | 2,8 – 4,5 | 7414-9695 (5931-7761) |
| | 0,13 | 2,6 – 3,9 | 7775-9914 (6221-7934) |
| | 0,12 | 3,4-4,3 | 6286-8033 (5032-6429) |
| | 0,11 | Destruction coatings | |

Table 2. Obtained values for optimizing the number of pulses compression plasma

| Formed coating | Total number of compression plasma pulse | Index of obtained porosity, % | Index of microhardness, MPa |
|---|--|-------------------------------|-----------------------------|
| Al ₂ O ₃ -TiO ₂ -Mo Distance processing (0,14 m) | 10 | 5,9-6,6 | 5443-7798 |
| | 11 | 4,2 – 5,3 | 6189-8004 |
| | 12 | 3,2 – 4,7 | 6940-9089 |
| | 13 | 3,1 – 4,6 | 7240-9380 |
| | 14 | 4,5-6,3 | 6581-8442 |
| | 15 | 4,9-6,7 | 6335-7994 |
| Al ₂ O ₃ -TiO ₂ -NiCrAlITa Distance processing (0,13 m) | 11 | 4,5-5,8 | 6357-8394 |
| | 12 | 3,0-4,11 | 7148-9193 |
| | 13 | 3,2 – 4,4 | 7381-9495 |
| | 14 | 2,6 – 3,9 | 7775-9914 |
| | 15 | 2,8 – 4,1 | 7976-10199 |
| | 16 | 3,6-4,9 | 7621-9103 |
| | 17 | 4,5-5,4 | 7109-8998 |

The total number of pulses for powder materials NiCrAlITa-Al₂O₃-TiO₂ than for Mo-Al₂O₃-TiO₂. This follows from the mechanism of layer-by-layer processing, in which the dimensions of the formed zone from a single pulse directly depend on the conditions of heat transfer to the depth of the created coating. When the heat transfer conditions deteriorate, for example, when creating a high total porosity or heterogeneity, a larger zone for energy concentration and the thickness of the coating layer obtained as a result of processing by a single pulse are needed. This is typical for Al₂O₃-TiO₂-Mo powders, since they are characterized by a structure with developed porosity and lower density compared to Al₂O₃-TiO₂-NiCrAlITa powder materials.

With reduced values of heat transfer and an increase in the thickness of the layer formed by a single pulse, the sum of pulses for the final processing of the entire coating becomes smaller. The structures of wear-resistant coatings formed on optimized processing modes are shown in Figure 4. In the melted metal-ceramic material, a fairly homogeneous distribution of structural elements contributes to an increase in the wear resistance parameters of the formed powder compositions. Traces of Mo particles and nickel alloys are visible on the structures as characteristic light shells. Significant changes in the morphology of the created surface are caused by the effects of plasma flows. The fact that the composition of the powder materials used changed slightly during the formation of coatings is evidenced by the preserved structure of composite particles after their collision with the substrate and exposure to plasma pulses. This is a qualitative indicator for creating the necessary performance properties, which are further improved when using the next modification.

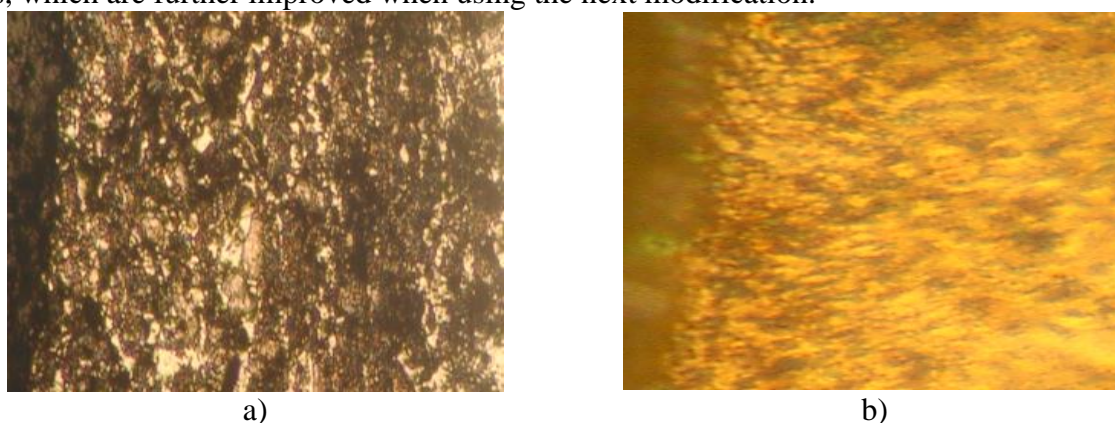


Figure 4. Structures of the developed wear-resistant: (a) Mo-Al₂O₃-TiO₂; (b) NiCrAlITa-Al₂O₃-TiO₂ after modification ($\times 500$)

3. Conclusion. Our studies allowed us to state that when the resulting wear-resistant plasma coatings are exposed to compression plasma flows, the following processes take place. The high amount of energy transferred by the plasma flow to the coating contributes to the melting of the surface layer with a thickness of 10–70 μm , depending on the coating material being processed. When exposed to a plasma flow, a certain part of the coating material can be removed due to the ablation effect. Moreover, the amount of material removed will increase with an increase in the energy transferred to the coating by the plasma flow. Under the influence of the pressure of the plasma flow, liquid-phase mixing will occur in the molten coating layer. At the last stage, the surface layer of the coating hardens under conditions of ultrafast cooling. It turns out that the phase and elemental composition of the surface layer of the coating changes significantly. A layer is formed in the coating, which contains elements of the coating and plasma-forming gas.

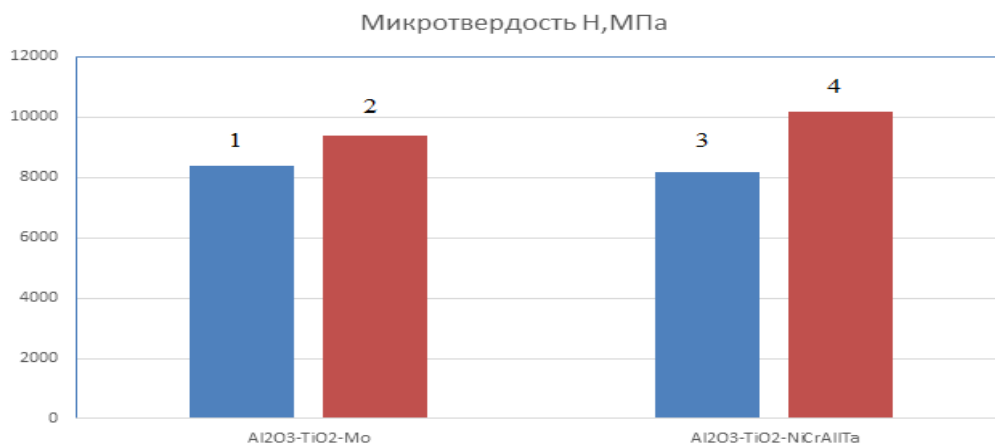


Figure 5. Indicators of microhardness of the formed coatings Mo-Al₂O₃-TiO₂ (1, 2) and NiCrAlTa-Al₂O₃-TiO₂ (3, 4) (1, 3 – process of plasma coating formation; 2, 4 – after modification by compression plasma)

And in the case of multi-stage processing of the "coating-base" system, a layer is formed that contains elements and coatings, and bases, and plasma-forming gas. With an increase in the energy absorbed by the coating due to a decrease in the distance from the electrodes to the part or an increase in the number of input processing pulses, the concentration of elements alloying the coating in the surface layer decreases, which in turn leads to a decrease in the concentration of intermetallic compounds in it. This is due to both an increase in the intensity of the ablation process and an increase in the thickness of the mixed coating layer (deeper penetration of the coating elements into the base). The resulting thickness of the mixed layer depends both on the processing modes and on the coating and base materials. Using the accepted technique, changing the used technological characteristics of the process of processing by pulses of the compression plasma flow, both the distance under the influences and their number were changed. The number of pulses significantly affects the thickness of the treated layers. The total number of pulses must create a melted coating with high strength characteristics throughout the entire thickness of the coating. According to the optimization data, the optimum distances for the formation of hardened structures for NiCrAlTa-Al₂O₃-TiO₂ are 0.13 m; for Mo-Al₂O₃-TiO₂ - 0.14 m. This is confirmed by the stabilization of the total porosity, at distances below 0.13 and 0.14 m there is no decrease due to the instantaneous dynamic and thermal effects (about 200 μs), as well as the maximum content of the refractory phase, which reduces the degree of melting. At distances below 0.11 m for NiCrAlTa-Al₂O₃-TiO₂ and 0.12 m for Mo-Al₂O₃-TiO₂, defects with the development of macro-cracks are noticeable. We also optimized the total number of pulses in the compression plasma. When the system is treated with a small amount of pulse, incomplete melting and partial mixing of the system components are observed. Processing with a large number of pulses is characterized by more uniform mixing. An increase in microhardness can also be due to the effects of rapid quenching: the sample experiences sharp heating up to the melting of the surface layer, followed by heat removal into the depth of the sample and rapid recrystallization. It was revealed as a result of research for the complete processing of the formed coatings for NiCrAlTa-Al₂O₃-TiO₂, 14-15 impacts are necessary, for Mo-Al₂O₃-TiO₂ - 12-13. A further increase is not necessary, the geometry of the created surface of the coating and the technological characteristics of the coating deteriorate due to remelting. The structure of wear-resistant coatings formed on optimized processing modes is a melted metal-ceramic material with a fairly homogeneous distribution of structural elements that contribute to an increase in

the wear resistance parameters of the formed powder compositions. Traces of Mo particles and nickel alloys are visible on the structures as characteristic light shells. Significant changes in the morphology of the created surface are caused by the effects of plasma flows. The fact that the composition of the powder materials used changed slightly during the formation of coatings is evidenced by the preserved structure of composite particles after their collision with the substrate and exposure to plasma pulses. This is a qualitative indicator for creating the necessary performance properties, which are further improved when using subsequent modifications. When studying the obtained properties of the formed coatings, the change in the average microhardness of the deposited compositions was analyzed. The microhardness increased by 1.15–1.25 times after the application of the modification, which is explained by the more efficient formation of phases with increased strength and amorphous structure during local melting of coatings with a thickness of approximately 30–50 μm , followed by instantaneous cooling, and the ability to ignore the recrystallization process.

LITERATURE:

1. Ilyushchenko, A. F. High-energy processing of plasma coatings / A. F. Ilyushchenko, V. A. Okovity, A. I. Shevtsov. – Minsk: Besprint, 2007. – 246 p.
2. Okovity, V. A. Formation and study of multilayer composite oxide plasma coatings on elements of screen anti-meteor protection ”for an international scientific and technical journal / Okovity V. A., Panteleenko F. I., Devoino O. G., Okovity V. V., Astashinsky V. M., Khramtsov P. P., Chernik M. Yu., Uglov V. V., Sobolevsky S. B. // “Science and technology” BNTU, 2016. – Issue 5. – P.357-364.
3. Panteleenko, F. I. Investigation of plasma two-layer composite coatings zirconium dioxide - nichrome / Panteleenko F. I., Okovity V. A., Panteleenko E. F. // “Actual problems in mechanical engineering”, NSTU – Novosibirsk- 2017. Volume 4. No. 3. – P. 100-105.
4. Okovity, V. A. Multilayer composite oxide plasma coatings on screen protection elements based on zirconium dioxide. / Okovity V. A., Panteleenko F. I., Okovity V. V., Astashinsky V. M., Khramtsov P. P., Chernik M. Yu., Uglov V. V., Sobolevsky S. B. // "Science and technology", BNTU – Minsk. – 2017. Issue 5. – P. 422-4311.
5. Okovity, V. A. Formation and study of plasma two-layer composite coatings (viscous NiCr metal layer and solid ZrO₂) / Okovity V. A., Panteleenko F. I., Okovity V. V., Astashinsky V. M., Khramtsov P. P., Chernik M. Yu., Uglov V. V., Sobolevsky S. B. // Science and technology, BNTU – Minsk. – 2018. – Issue. 1. – S. 21-28.
6. Ilyushchenko, A. Ph. Laser processing of plasma spraying coatings /A. Ph. Ilyushchenko, V. A. Okovity, N. K. Tolochko // Materials and manufacturing processes. – New York (USA) – 2002. – vol.17. – No. 2. – P. 157-167.
7. Wang, Yu. Laser remelting of the surface of nanostructured Al₂O₃-13 wt.% TiO₂ coatings deposited by plasma spraying on a titanium alloy / Yu. Wang, G. Li, V. Tian, Yu. Yang // Applied Surface Science. – 2009. – T. 255. – S. 8603–8610.
8. Laser remelting of plasma nanostructured Al₂O₃-TiO₂ coatings at different laser power / Yu. Wang [et al.] // Technology of Surfaces and Coatings. – 2010. – T. 204. – S. 3559-3566.
9. Dubur, L. Properties of alumina-titanium coatings obtained by laser deposition in air plasma / L. Dubur, R. S. Lima, K. Moro // Technology of surfaces and coatings. – 2007. – T. 201. – S. 6278-6284.
10. Development of the microstructure of laser-remelted coatings Al₂O₃-13 wt. % TiO₂ / S. G. Li [et al.] // Journal of alloys and compounds. – 2013. – T. 576. – S. 187-194.

Received by the editors 27.01.2023.

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|---|-----------|
| Бохонский А. И., Варминская Н. И., Майстришин М. М. ОПТИМАЛЬНОЕ ВРАЩЕНИЕ КОСМИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА С УЧЕТОМ КОЛЕБАНИЙ СОЛНЕЧНЫХ БАТАРЕЙ | 3 |
| Горобец И. А. ИССЛЕДОВАНИЕ ПИКОВЫХ НАГРУЗОК ПРИВОДА ГОРНЫХ МАШИН ... | 8 |
| Грубка Р. М. ТРАЕКТОРИЯ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ СПЕЦИАЛЬНО СПРОФИЛИРОВАННОГО ИНСТРУМЕНТА ПРИ МНОГОКООРДИНАТНОЙ ОБРАБОТКЕ ЗУБЬЕВ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ КОЛЕС МЕТОДОМ КОПИРОВАНИЯ | 15 |
| Зайдес С. А., Хо Минь Куан МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ПРИ МАЯТНИКОВОМ ПОВЕРХНОСТНОМ ПЛАСТИЧЕСКОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ | 23 |
| Коровин В. А., Леушин И. О., Беляев С. В., Демченко А. И., Хацько М. С., Панов А. Г. ВЛИЯНИЕ ФИЛЬТРАЦИОННОГО РАФИНИРОВАНИЯ НА МИКРОСТРУКТУРУ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СПЛАВ ВЖ-159 | 29 |
| Лахин А. М. ПОВЫШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ИЗДЕЛИЙ С ЗУБЧАТЫМ ВЕНЦОМ | 35 |
| Михайлов А.Н., Анастасьев А. В., Пичко Н. С. МЕТОДИКА СИНТЕЗА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПОВЫШЕНИЯ РЕСУРСА ОТДЕЛОЧНО-УПРОЧНЯЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ ЛОПАТОК ТУРБИНЫ ГТД | 41 |
| Михайлов А. Н., Котляров В. Б., Котляров Б. С., Котляров С. Б. ОПТИМИЗАЦИЯ ФОТ-ПРОЦЕССА ПОДГОТОВКИ МОДИФИЦИРОВАННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПОД ФИНИШНЫЕ ОПЕРАЦИИ НАПЫЛЕНИЕМ И ОПРЕДЕЛЕНИЕМ ПРИПУСКОВ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ МЕХАНООБРАБОТКИ | 51 |
| Пипкин Ю. В. БАРИЦЕНТРИЧЕСКИЕ КООРДИНАТЫ НА БАЗИСЕ ОПОРНОГО ТРЕУГОЛЬНИКА ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ СИЛОВОГО ЗАМЫКАНИЯ СТАНОЧНОГО ПРИСПОСОБЛЕНИЯ | 62 |
| Тюрин А.Н., Королев А. В. ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ КОМБИНИРОВАННОЙ РАЗМЕРНОЙ И СУПЕРФИНИШНОЙ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ ПОДШИПНИКОВ | 72 |

| | |
|---|-----------|
| Шишкарев М. П. ТЕХНИКО-ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ БАЗОВОГО ВАРИАНТА АДАПТИВНОЙ ФРИКЦИОННОЙ МУФТЫ ВТОРОГО ПОКОЛЕНИЯ | 81 |
| Panteleenko F. I., Okovity V. A., Devoino O. G., Volodko A. S., Sidorov V. A., Okovity V. V., Litvinko A. A., Astashinsky V. M. INVESTIGATION OF THE IMPACT OF COMPRESSION PLASMA FLOWS ON MULTILAYER COATINGS | 90 |

ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ

| | |
|-------------------|-------|
| Astashinsky V. M. | 90 |
| Devoino O. G. | 90 |
| Litvinko A. A. | 90 |
| Okovity V. A. | 90 |
| Okovity V. V. | 90 |
| Panteleenko F. I. | 90 |
| Sidorov V. A. | 90 |
| Volodko A. S. | 90 |
| Анастасьев А. В. | 41 |
| Беляев С. В. | 29 |
| Бохонский А. И. | 3 |
| Варминская Н. И. | 3 |
| Горобец И. А. | 8 |
| Грубка Р. М. | 15 |
| Демченко А. И. | 29 |
| Зайдес С.А. | 23 |
| Коровин В.А. | 29 |
| Королев А. В. | 72 |
| Котляров Б. С. | 51 |
| Котляров В. Б. | 51 |
| Котляров С. Б. | 51 |
| Лахин А. М. | 35 |
| Леушин И.О. | 29 |
| Майстришин М.М. | 3 |
| Михайлов А. Н. | 41,51 |
| Панов А. Г. | 29 |
| Пипкин Ю. В. | 62 |
| Пичко Н. С. | 41 |
| Тюрин А.Н. | 72 |
| Хацько М. С. | 29 |
| Хо Минь Куан | 23 |
| Шишкарев М. П. | 81 |

ПРАВИЛА
представления материалов в международный сборник научных трудов
Донецкого национального технического университета
«ПРОГРЕССИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ МАШИНОСТРОЕНИЯ»

Международный сборник научных трудов Донецкого национального технического университета «Прогрессивные технологии и системы машиностроения» издается с 1994 года. В этом сборнике публикуются ученые и специалисты более чем из 35 стран мира.

Сборник научных трудов является специальным изданием, научно-технические статьи которого проходят **обязательное рецензирование**. Данный сборник включен в следующие программы:

1. В сборнике могут публиковаться научно-технические статьи и результаты диссертационных работ.
2. Сборник включен в **перечень ВАК ДНР** (приказ № 774 от 24.07.2017 г.).
3. Сборник имеет сайт <http://ptsm.donntu.ru>, а также размещен на сайте кафедры «Технология машиностроения» ДонНТУ, г. Донецк: <http://tm.donntu.ru>
4. Сборник включен **базу данных РИНЦ (Российский индекс научного цитирования) (лицензионный договор № 177-04/2013 от 12.04. 2013 г.)** и размещен на сайте НЭБ (Научная электронная библиотека, г. Москва, Россия, <http://elibrary.ru>)
5. Данный сборник имеет **международную индексацию ISSN 2073-3216 (печатная версия) и ISSN 2518-7120 (сетевое издание)**

Статьи представляемые в данный сборник должны отвечать следующим требованиям.

Содержание статей должно отражать новые достижения науки и техники в области машиностроения, их практическое значение, соответствовать технической направленности сборника и представлять интерес для широкого круга специалистов.

В статье должно быть кратко изложено то новое и оригинальное, что разработано авторами, показано преимущество перед аналогами предлагаемых разработок, описаны их особенности и практическая значимость. Результаты работы не должны представляться в виде тезисов.

Ответственность за нарушение авторских прав, за несоблюдение действующих стандартов и за недостоверность в статье данных полностью несут авторы статьи.

Присланные в редакционную коллегию статьи подвергаются обязательному рецензированию. Редакционная коллегия оставляет за собой право вносить в текст статьи изменения редакционного характера без согласования с авторами, а также не публиковать статьи, которые не отвечают нашим требованиям.

Языки представления рукописей русский и английский.

ОСНОВНАЯ ТЕМАТИКА СБОРНИКА

Тематика представляемых статей должна основываться на проблемах машиностроения (механики) и представляться в рамках следующих направлений:

1. Практика и перспективы создания и применения прогрессивных и нетрадиционных технологий машиностроения. Интегрированные технологии. Сборка в машино- и приборостроении. Абразивные и виброабразивные технологии. Гибридные и комбинированные технологии машиностроения.

2. Механизация и автоматизация производственных процессов машиностроения. Прогрессивное оборудование машиностроительных производств.

3. Комплексная автоматизация проектирования, подготовки и управления машиностроительным производством.

4. Проблемы создания и применения прогрессивных инструментов и инструментальных материалов в машиностроении.

5. Управление качеством продукции и технических систем машиностроения. Проблемы инженерии поверхностного слоя изделий.

6. Современные проблемы машиноведения и деталей машин.

7. Современные проблемы инженерии материалов. Упрочняющие технологии и покрытия изделий машиностроения. Наноматериалы и нанотехнологии в машиностроении.

8. Вопросы моделирования и расчетов сложных технологических систем машиностроения.

В рамках сборника можно представлять рекламу продукции, которая будет помещена после рукописей статей.

СОДЕРЖАНИЕ СТАТЕЙ

Научно-технические статьи, представляемые в данный сборник должны иметь следующие элементы:

- постановка проблемы в общем виде и ее связь с важными научными и практическими заданиями;

- анализ последних достижений и публикаций, в которых начато решение данной проблемы, выделение нерешенных раньше частей общей проблемы, которым посвящается данная статья;

- формулирование цели и постановка задач работы;

- представление основного материала исследования с полным обоснованием полученных научных результатов, формулирование рекомендаций;

- выводы по данному исследованию и перспективы дальнейшего развития данного направления.

ПРЕДСТАВЛЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ

Для принятия решения о включении материалов Вашей статьи в сборник необходимо выслать в адрес редакционной коллегии следующее:

- заявку и сведения об авторах статьи;
- материалы статьи;
- экспертное заключение о возможности публикации статьи в открытой печати;
- все материалы отправляются по E-mail по адресам: tm@fimm.donntu.ru или mntk21@mail.ru .

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ

1. Текст статьи выполняется объемом от 5 до 10 страниц (**обязательно полные страницы**), формат А4 (210x297 мм) с полями: верхнее и нижнее – 30 мм, а левое и правое - 25 мм. Страницы не нумеровать. Статьи оформить с применением редактора WinWord (не ниже версии 6,0) шрифтом Times New Roman, выполненным в соответствии с образцом оформления, межстрочный интервал - 1,0, шрифт – 12pt. Материалы представить в электронном виде.

2. Порядок оформления. Материалы должны отвечать следующей структурной схеме: УДК, инициалы и фамилии авторов, ученая степень и звание (сокращение по ГОСТ 7.11-2003 и 7.12-2003), полное название организаций и стран, тел./факс, E-mail, название статьи, аннотация на языке статьи, ключевые слова, основной текст, заключение

или выводы, список литературы, дополнительные аннотации на других языках с ключевыми словами, внизу первой страницы необходимо указать авторский знак - ©. **УДК** печатать прописными (жирными) буквами в верхнем правом углу не отступая от верхнего поля. На следующей строке слева жирными строчными буквами – **инициалы и фамилии** авторов с учеными степенями и званиями, на следующих строках – полное название организаций и стран (через запятую, слева). На следующей строке курсивом слева – тел./факс и электронный адрес одного из авторов. Через один интервал - название статьи, печатать прописными (жирными) буквами, без переносов, центрировать по ширине, максимумом три строки. Через один интервал - аннотации с ключевыми словами (слово аннотация не пишется) на двух языках шрифтом 10 pt, *курсивом*. Через один интервал – материалы статьи, шрифт 12 pt (язык изложения – по выбору авторов, межстрочный интервал 1,0). Внизу первой страницы статьи необходимо указать авторский знак - ©. Между соответствующими разделами статьи необходимо делать интервал. (См. образец оформления материалов). Абзац текста – 1,25.

3. Графический материал (рисунки, графики, схемы) следует выполнять в формате *.bmp, *.gif, *.psx, *.dwg, *.jpg - размерами не менее 60x60 мм внедренными объектами (по ходу материалов). Все позиции, обозначенные на рисунке, должны быть объяснены в тексте. Позиции на рисунке должны располагаться по часовой стрелке. Под каждым рисунком указывается его номер и название, например: Рисунок 3. Схема устройства. Текст названия рисунка группируется с рисунком. Каждый рисунок должен иметь один интервал сверху и снизу.

4. Формулы и математические знаки должны быть понятны. Показатели, степени и индексы должны быть меньше основных знаков и выполняться в соответствии с редактором формул Microsoft Equation. Формулы номеруются (справа в круглых скобках, не отступая от правого поля), только в том случае, если на них в тексте имеются ссылки. Между крайними знаками формулы и текстом должен выполняться один интервал. Формулы выполняются курсивом.

Стиль формул для Microsoft Equation: Full - 12 pt, Subscript/Superscript - 10 pt, Sub-Subscript/Superscript - 8 pt, Symbol - 12 pt, Sub-Symbol - 10 pt.

5. Все таблицы должны иметь название и порядковый номер и располагаться после упоминания по тексту, например: Таблица 2. Классификация муфт. Каждая таблица должна иметь один интервал сверху и снизу.

6. **Список литературы** должен быть приведен в конце статьи в соответствии с ГОСТ 7.1-2003 . Перечень ссылок должен быть составлен в порядке упоминания в тексте. Ссылки на литературу заключаются в квадратные скобки. Количество библиографических источников должно быть не менее 5, в том числе 3 источника должно быть за последние 5 лет.

7. Файл со статьей необходимо назвать по фамилиям и инициалам авторов в соответствии с работой (например: Иванов И.И., Петренко П.П.)

8. Материалы статьи представляются в электронном виде.

9. Материалы, не отвечающие перечисленным требованиям и тематике данного сборника, а также поступившие в редакционную коллегию с опозданием, **опубликованы не будут**.

СТАТЬИ ДОЛЖНЫ ИМЕТЬ СЛЕДУЮЩУЮ СТРУКТУРУ:

1. **УДК** (Например, **УДК 621.01**) (располагать сверху справа, шрифт жирный, 12 pt).

2. Инициалы и фамилии авторов (слева, шрифт жирный, 12 pt), ученая степень и звание, затем на следующей строке - полное название *организаций и стран* (слева, 12 pt), на следующей строке – *Тел./факс и электронный адрес* (слева, курсив, 12 pt).

3. Название статьи (слева, шрифт жирный, 12 pt, максимум три строки).

4. Пустые строки, межстрочный интервал и размеры шрифта статьи. Пустые строки выполняются между названием статьи - вверху и внизу, перед соответствующими разделами работы (один пробел) и списком литературы, а также между дополнительной аннотацией вверху и внизу. Межстрочный интервал – **1,0**. Размер шрифта статьи - **12 pt**, размер шрифта аннотаций и авторского знака - **10 pt**.

5. Аннотации (Abstract) (слово аннотация не пишется), (курсив, 10 pt). Первая аннотация пишется на языке статьи, а вторая на английском, если статья на английском языке, первая аннотация пишется на английском языке, а вторая – на русском языке.

В аннотации приводятся краткие сведения о всей статье в целом на языке статьи. Объем аннотаций приблизительно до 10 строк, аннотация выполняется курсивом.

6. Ключевые слова (Keywords) (приводится 5-6 ключевых слов статьи), выполняются курсивом на следующей строке от аннотации. (курсив, 10 pt)

7. Введение (Introduction). (12 pt)

Во введении приводится аналитический (исторический) обзор современного состояния вопроса исследования, выполняется постановка проблемы исследования или показывается актуальность данного исследования (работы). Здесь нужно обязательно указать результаты последних исследований других авторов. А также сформулировать цель и задачи исследований.

8. Основное содержание и результаты работы (The main contents and outcomes of activity). (Авторы могут дополнять работу другими разделами) (12 pt).

В данном разделе излагаются и подробно разъясняются полученные авторами теоретические положения и практические результаты. Приводятся принятые гипотезы и используемые допущения, разъясняются малоизвестные термины, аббревиатуры и условные обозначения. Для теоретических положений приводятся их доказательства и необходимые математические преобразования. Для экспериментальных исследований кратко описываются методики их проведения, способы обработки данных и результаты проверок адекватности и достоверности результатов.

9. Авторский знак. Внизу первой страницы статьи необходимо указать авторский знак - ©. Например: © Иванов И.И., Петренко П.П.; 2022 (10 pt).

10. Заключение (Conclusion) (12 pt)

В заключении излагаются выводы по полученным авторами результатам, описываются примеры их практического применения, предлагаются рекомендации относительно их использования, приводятся выводы, а также указываются перспективы дальнейших исследований по данной проблематике.

11. Литература (References). (12 pt)

Список литературных источников должен быть составлен в порядке ссылок на них. Ссылки на литературу в тексте статьи заключаются в квадратные скобки. Количество библиографических источников должно быть не менее 5-6, в том числе 3 источника должно быть за последние 5 лет.

АДРЕС РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ:

ДНР, 283001, г. Донецк, ул. Артема, 58, ДонНТУ, кафедра «Технология машиностроения», Редакционная коллегия сборника.

Тел./факс: +7-856- 301-08-40.

E-mail: tm@fimm.donntu.ru или mntk21@mail.ru

<http://ptsm.donntu.ru>

- **Публикация статей в международном сборнике научных трудов «Прогрессивные технологии и системы машиностроения» - выполняется бесплатно**

Образец оформления материалов
УДК 621.85.05-034(12 pt)

И. И. Иванов, д-р техн. наук, проф., **П. П. Петренко**, ассист. (12 pt)

Донецкий национальный технический университет, ДНР (12 pt)

Брянский государственный технический университет, Россия (12 pt)

Тел./Факс: +7 (856) 3050104; E-mail: tm@fimm.donntu.ru (курсив, 12 pt)

(пустая строка - 12 pt)

ОСНОВЫ СТРУКТУРНОГО СИНТЕЗА СБОРОЧНЫХ СИСТЕМ (слева, 12 PT, ЖИРНЫМ, ЗАГЛАВИЕ МАКСИМУМ ТРИ СТРОКИ)

(пустая строка - 12 pt)

*В статье приведены данные по структурному синтезу сборочных
..... уравнений описывающих процесс сборки изделий. (курсив, 10 pt, до 10 строк).*

Ключевые слова: структура технологии, синтез, процесс, технология, сборка. (курсив, 10 pt, 5 ...6 слов)

(пустая строка - 10 pt)

I. I. Ivanov, P. P. Petrenko (10 pt)

(10 pt)

BASES OF THE STRUCTURED SYNTHESSES OF THE ASSEMBLY SYSTEMS (10 pt)

*The efficient design of assembly machinery is vitally important
..... as noun description of functions of presented in the paper.*

Keywords: structured syntheses, process of the assembly, technological system. (курсив, 10 pt)

(пустая строка - 12 pt)

1. Введение (12 pt)

Сборочные системы являются сложными иерархическими системами. Одним из условий [1] повышения производительности ... сборочных технологических систем (рис. 5). Технологические системы

(пустая строка - 12 pt)

2. Основное содержание и результаты работы (12 pt)

Для сборки изделий широко применяются технологические системы
информационные и другие потоки могут быть описаны следующим образом:

$$k_m = \sqrt{a^2 + b^2}, \quad (1)$$

где k_m - элемент множества;

..... позволили разработать общие алгоритмы функционирования системы.

(пустая строка - 12 pt)

3. Общий алгоритм и рекомендации (12 pt)

Выполненные исследования позволили разработать общий алгоритм

..... основывается на итерационном подходе.

(пустая строка - 12 pt)

4. Цифровые модели (12 pt)

В работе разработаны цифровые структурно-логические модели структуры сборочных систем, выполненные с применением основных положений алгебры структур

(пустая строка - 12 pt)

5. Заключение (12 pt)

Таким образом, выполненные исследования позволили реализовать следующее:

1. Разработать методику синтеза структурных вариантов

..... отличительной особенностью данной методики.

2. Установить закономерности

..... позволили произвести процесс итерации.

3. Разработать рекомендации

© Иванов И.И., Петренко П.П.; 2022 (приводится внизу первой страницы статьи, 10 pt)

..... внедрить на производстве.

(пустая строка - 12 pt)

ЛИТЕРАТУРА:

(центрировать, 12 pt, не менее 5 ... 6 библиографических источников)

1. Ким, И. П. Исследование эффективности роторных машин / И. П. Ким. – К: КПИ, 1985. – 123 с. ISBN 966-7907-22-8.

2. Устюгов, А. В. Надежность технологических машин / А. В. Устюгов. – Донецк: ДонНТУ, 1998. – 425 с. ISBN 966-7907-23-6.

3. Савельев, А. А. Сборка машин / А. А. Савельев – М.: Наука, 2009. - 342 с. ISBN 966-7907-26-9.

4. Михайлов, А. Н. Основы синтеза функционально-ориентированных технологий / А. Н. Михайлов – Донецк: ДонНТУ, 2009. – 346 с. ISBN 966-7907-24-4.

5. Базров, Б. М. Модульные технологии / Б. М. Базров. – М.: Машиностроение, 2000. – 368 с. ISBN 5-217-03061-5.

6. Сидоров, И. А. Учет переменности параметров процесса точения фасонных поверхностей при определении оптимальных режимов резания / И.А. Сидоров, А.Н. Алехин // Научно-технический журнал. – М.: Машиностроение, 2014. - № 9. – С. 11-17.

7. Любшин, А. Н. Особенности полировки лопаток с коррозионными разрушениями покрытий / А. Н. Любшин, А. Н. Шейко, Б. Л. Недашковский // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научных работ. – Донецк: ДонНТУ, 2013. – Вып. 1 (25). – С. 207-212.

(пустая строка - 12 pt)

Поступила в редколлегию _____ (дата поступления статьи, 10 pt)

НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ

**ПРОГРЕССИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И
СИСТЕМЫ МАШИНОСТРОЕНИЯ**

Выпуск 1 (80)' 2023

Главный редактор

д-р техн. наук, проф. А. Н. Михайлов

Е-mail: tm@fimm.donntu.ru

Технический редактор Л. Б. Ступакова

*Учредитель и издатель – ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ*

Адрес издателя: ДНР, 283001, г. Донецк, ул. Артема, 58, ГОУВПО «ДОННТУ»,
+7 (856) 337-17-33, 335-75-62

Адрес редакции: ДНР, 283001, г. Донецк, ул. Артема, 58, тел. +7 (949) 306-08-79,
+7 (856) 301-08-05.

Е-mail: tm@fimm.donntu.ru

Сайт: <http://ptsm.donntu.ru>

Сборник (Е) зарегистрирован в Министерстве информации Донецкой Народной Республики.