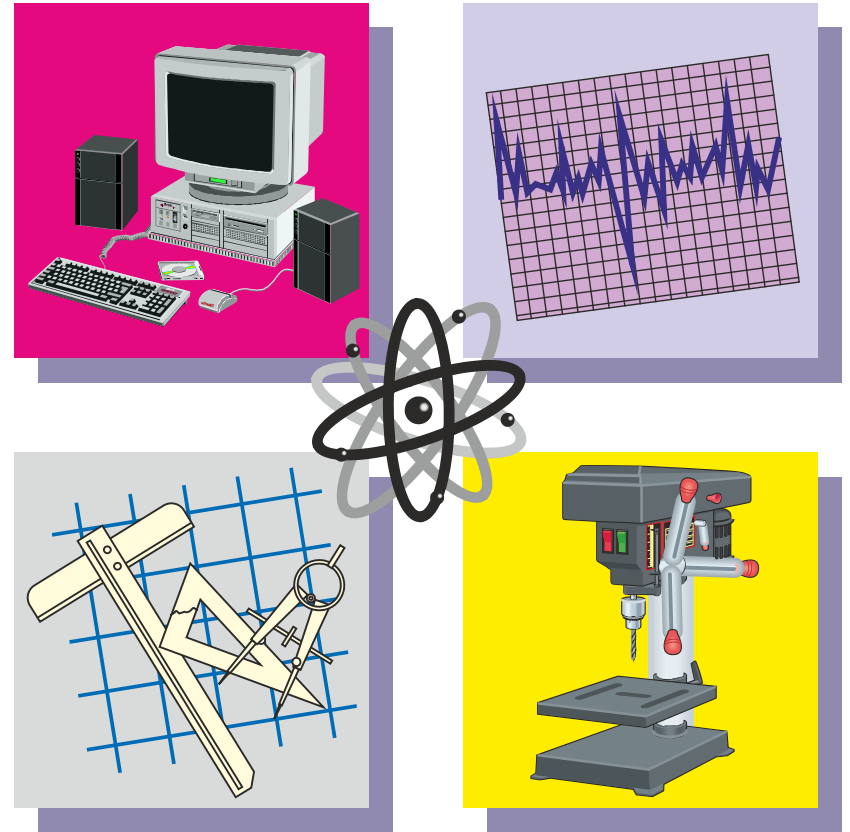


№ 2(34)' 2022 Студенческий научно-технический журнал ИНЖЕНЕР

*Студенческий научно-технический
журнал*

ИНЖЕНЕР

№ 2(34)' 2022



ДОНЕЦК - 2022



ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ
«ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

ИНЖЕНЕР

*Студенческий научно-технический
журнал*

Основан в 2000 году

№ 2(34) '2022

Донецк – 2022

УДК 62

Рекомендован к изданию Ученым Советом Донецкого национального технического университета (протокол № 3 от 24 июня 2022 г.)

Журнал «Инженер» ориентирован на публикацию научных работ студентов, магистрантов, стажеров, аспирантов, молодых специалистов по вопросам: создания и применения прогрессивных технологий; информационных технологий; механизации и автоматизации производственных процессов; управления качеством, метрологии, сертификации; вопросам экономической теории и практики; моделирования, расчетов и проектирования сложных технических систем, экологических проблем промышленности.

Издается при содействии Международного союза машиностроителей

Учредитель – Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Донецкий национальный технический университет»

Главный редактор
Зам. гл. редактора
Отв. секретарь

Михайлов А. Н.
Чернышев Е.А.
Лахин А.М..

Редакционная коллегия:

Буленков Е. А., Голубов Н. В., Горобец И. А., Грубка Р. М., Петряева И.А., Селивра С. А.

Адрес редакции:

ДонНТУ, каф. ТМ
6-й учебный корпус, 6.305
ул. Артема, 58
283001, г. Донецк, ДНР, РФ
Тел. моб.: +7 949 3060879

Журнал зарегистрирован в Министерстве информации Донецкой Народной Республики. Регистрационный номер 000134 от 06 июня 2017 г.

ISSN 2073-5804

© ГОУВПО «Донецкий национальный технический университет», 2022

УДК 621

АНАЛИЗ РАЗМЕРОВ ЧАСТИЦ ДРЕВЕСНОЙ ПЫЛИ, ОБРАЗУЮЩЕЙСЯ ПРИ СВЕРЛЕНИИ, С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОМЕНТОВ ФУНКЦИИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ

Ашихмин Д.В., Бараниченко В.В., Русяков Д.В., Шаповалов Д.А., Чеченев А.В.
(ДГТУ, г. Ростов-на-Дону, Россия)

Тел: +7 (951) 5180020; E-mail: denis_shapov94@mail.ru

Abstract: A new mathematical approach for dust size distribution analysis with respect to wood drilling is proposed. It is found that dust investigated obeys the one-parametric exponential distribution. The technique elaborated may be embraced to different dusts investigations.

Древесная пыль, образующаяся при сверлении древесины, не только ухудшает качество обработки, но наносит ущерб здоровью человека и загрязняет окружающую среду. Чтобы исключить ее негативное влияние используют циклоны [1], действие которых основано на конкуренции инерционных и аэродинамических сил. Эффективность циклонов обеспечивается аэродинамическим расчетом, исходными данными которого выступает геометрия улавливаемых частиц. Вследствие существенной неоднородности древесной технологической пыли (см. рис. 1) ее геометрические характеристики имеют статистическую природу, что выдвигает жесткие требования к корректности их осреднения. Поэтому достоверные научные данные о геометрии такой пыли крайне актуальны для рациональной организации пылеулавливания.

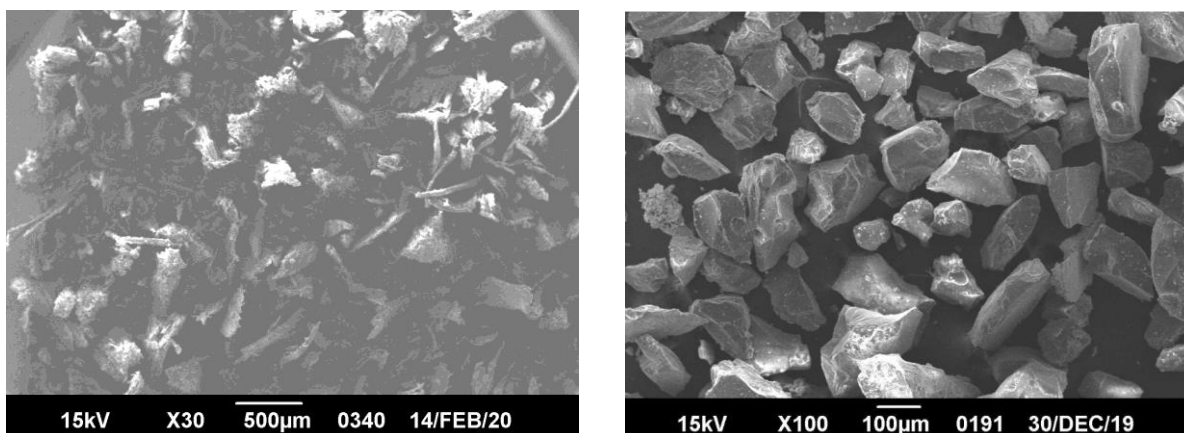


Рис. 1. Технологическая пыль, образовавшаяся при сверлении древесины (слева) и при обдирочно-шлифовальной обработке чугуна – абразивная составляющая (справа)

Целью данного исследования является разработка эффективных математических методов для корректного определения размерных параметров древесной пыли, образующейся в различных технологических процессах. Предполагается также распространение полученных методических результатов на исследования мелкодисперсных отходов различных производств.

Идея работы состоит в том, что каждой функции распределения частиц по размерам $F(x)$ можно сопоставить некоторый функционал, в частности, некоторый ее момент. Если же ей сопоставить набор таких моментов, можно исключить неоднознач-

ность ее идентификации. В данной работе предлагается использовать набор специальным образом нормированных моментов. Для однопараметрических распределений, к которым часто относятся результаты однократного дробления эти моменты могут быть вычислены в квадратурах. После надлежащего нормирования они составят вполне определенный вектор, отвечающий форме $F(x)$, а масштабный коэффициент определится естественным образом.

Практически удобно пользоваться не самими моментами $F(x)$, а их комбинациями, известными как заутеровские размеры [2-3]:

$$x_{nm} = \left[\frac{\int_0^{\infty} x^n dF(x)}{\int_0^{\infty} x^m dF(x)} \right]^{\frac{1}{n-m}}, \quad (1)$$

которая с учётом известного соотношения $dF(x) = F'_x(x) dx = p(x) dx$ записывается как

$$x_{nm} = \left[\frac{\int_0^{\infty} x^n p(x) dx}{\int_0^{\infty} x^m p(x) dx} \right]^{\frac{1}{n-m}}. \quad (2)$$

В последней формуле $p(x)$ – т.н. дифференциальная функция распределения или плотность вероятности.

Если же $F(x)$ дискретна, заутеровские радиусы вычисляются по формуле:

$$x_{nm} = \left[\frac{\sum_{i=1}^I x_i^n}{\sum_{i=1}^I x_i^m} \right]^{\frac{1}{n-m}}, \quad (3)$$

в которой i – номер частицы, I – их общее число.

Удобно ввести безразмерный коэффициент $k_{nm} = x_{nm}/x_{10}$, позволяющий каждой $F(x)$ сопоставить безразмерный вектор. Результаты вычислений для нескольких однопараметрических распределений $F(x, a)$ собраны в табл. 1. В этой таблице все значения выражаются в конечной алгебраической и/или тригонометрической форме. Однако вследствие громоздкости пятая и девятая строки даются в числовом выражении.

Тестирование распознающего алгоритма выполнялось следующим образом. Задавались 17 различных распределений из числа приведенных в табл. 1, причем с неизвестным параметром a . В выборках фигурировало по 30-300 чисел. Для каждой выборки по формуле

$$k_{nm} = \left[\frac{\sum_{i=1}^I x_i^n}{\sum_{i=1}^I x_i^m} \right]^{\frac{1}{n-m}} / \frac{\sum_{i=1}^I x_i^1}{\sum_{i=1}^I x_i^0} \quad (4)$$

рассчитывались отвечающие ей коэффициенты. Затем полученные коэффициентный вектор сравнивался с соответствующими векторами табл. 1. Наиболее полно отвечающим эксперименту считался табличный вектор, минимально отличающийся от тестируемого, т.е. удовлетворяющий соотношению [4]:

$$\sum_{n=1}^4 \sum_{m=0}^{n-1} (k_{nm} - k_{nm}^{\text{эксп}})^2 \rightarrow \min. \quad (5)$$

Результаты тестового эксперимента приведены в табл. 2. Результаты тестового эксперимента приведены в табл. 2. Как показал компьютерный эксперимент с предлагаемой техникой идентификацией распределений, практическая эффективность разработки оказалась крайне высокой, что позволяет наращивать базу образцовых функций и стимулирует распространение методики на двух и более параметрические распределения.

Таблица 1

Значения первых десяти коэффициентов k_{nm}

Функция распределения	Коэффициент								
	k_{20}	k_{21}	k_{30}	k_{31}	k_{32}	k_{40}	k_{41}	k_{42}	k_{43}
$\frac{1}{a}$	$\frac{2}{3}\sqrt{3}$	$\frac{4}{3}$	$\frac{\sqrt[3]{16}}{2}$	$\sqrt{2}$	$\frac{3}{2}$	$\frac{2\sqrt[3]{125}}{5}$	$\frac{2\sqrt[3]{50}}{5}$	$\frac{2\sqrt{15}}{5}$	$\frac{8}{5}$
$(-x^2 + a^2) \cdot \frac{3}{2}a$	$\frac{8\sqrt{5}}{15}$	$\frac{64}{45}$	$\frac{\sqrt[3]{64}}{3}$	$\frac{8\sqrt{3}}{9}$	$\frac{5}{3}$	$\frac{8\sqrt[4]{3 \cdot 35^3}}{105}$	$\frac{8\sqrt[3]{3 \cdot 35^2}}{105}$	$\frac{8\sqrt{21}}{21}$	$\frac{64}{35}$
$\begin{cases} \left(1 - \frac{x}{a}\right) \cdot \frac{1}{a} - \frac{1}{2a}, x < \frac{a}{2} \\ \left(\frac{x}{a^2} - \frac{1}{2a}\right) \cdot 4, x > \frac{a}{2} \end{cases}$	$\frac{\sqrt{24}}{8}$	$\frac{3}{2}$	$\frac{\sqrt[3]{5 \cdot 16^2}}{8}$	$\frac{\sqrt{40}}{4}$	$\frac{5}{3}$	$\frac{\sqrt[4]{13 \cdot 48^3}}{24}$	$\frac{\sqrt[3]{13 \cdot 24^2}}{12}$	$\frac{\sqrt{13 \cdot 18}}{9}$	$\frac{26}{15}$
$\begin{cases} \frac{4x}{a^2}, x < \frac{x}{2} \\ \left(\frac{1}{a} - \frac{x}{a^2}\right) \cdot 4, x > \frac{a}{2} \end{cases}$	$\frac{\sqrt{168}}{12}$	$\frac{7}{6}$	$\frac{\sqrt[3]{768}}{8}$	$\frac{\sqrt{24}}{8}$	$\frac{9}{7}$	$\frac{\sqrt[4]{31 \cdot 240}}{120}$	$\frac{\sqrt[3]{31 \cdot 120}}{120}$	$\frac{\sqrt{31 \cdot 70}}{35}$	$\frac{62}{45}$
$e^{-\frac{x}{a}} \cdot \frac{1}{a} \cdot \frac{e}{e-1}$	1,206	1,454	1,351	1,571	1,697	1,461	1,657	1,769	1,844
$(-x^2 + ax) \cdot \frac{6}{a^3}$	$\frac{\sqrt{30}}{5}$	$\frac{6}{5}$	$\frac{2\sqrt[3]{25}}{5}$	$\frac{2\sqrt{10}}{5}$	$\frac{4}{3}$	$\frac{2\sqrt[3]{343}}{7}$	$\frac{2\sqrt[3]{98}}{7}$	$\frac{2\sqrt{210}}{21}$	$\frac{10}{7}$
$ax \frac{2}{a^3}$	$\frac{3\sqrt{2}}{4}$	$\frac{9}{8}$	$\frac{3\sqrt[3]{50}}{10}$	$\frac{3\sqrt{15}}{10}$	$\frac{6}{5}$	$\frac{3\sqrt[4]{27}}{2}$	$\frac{3\sqrt[3]{4}}{4}$	$\frac{\sqrt{6}}{2}$	$\frac{5}{4}$
$2 \cdot \frac{(-x+a)}{a^2}$	$\frac{\sqrt{6}}{2}$	$\frac{3}{2}$	$\frac{3\sqrt[3]{100}}{10}$	$\frac{3\sqrt{30}}{10}$	$\frac{9}{5}$	$\frac{\sqrt[4]{15^3}}{5}$	$\frac{3\sqrt[3]{25}}{5}$	$\frac{3\sqrt{10}}{5}$	2
$\frac{\pi}{2a} \cdot \sin \frac{x\pi}{a}$	1,091	1,189	1,162	1,252	1,319	1,22	1,304	1,165	1,413
$\frac{12}{a^3}x^3 - \frac{12}{a^2}x + \frac{3}{a}$	$\frac{2\sqrt{10}}{5}$	$\frac{8}{5}$	$\frac{\sqrt[3]{7 \cdot 20^2}}{10}$	$\frac{\sqrt{70}}{5}$	$\frac{7}{4}$	$\frac{2\sqrt[4]{11 \cdot 35}}{35}$	$\frac{2\sqrt[3]{22 \cdot 35}}{35}$	$\frac{\sqrt{11 \cdot 14}}{7}$	$\frac{88}{49}$

Практически важным результатом, полученным с помощью описанного подхода является определение функции распределения сосновой пыли, образующейся в процессе сверления сосны диаметрами от 1 до 35 мм. Установлено, что образующаяся пыле-стружка состоит из двух фракций – мелкой, не зависящей от диаметра сверла и крупной – зависящей. При этом оказалось, что размеры частиц мелкой фракции подчиняются экспоненциальному распределению:

$$F(x) \approx 1 - \exp[-x/120 \text{ мкм}], \quad (6)$$

а ее доля зависит от диаметра сверла.

Результаты выполненных авторами исследований сводятся к следующему:

- предложена методика идентификации однопараметрических функций распределения на основе интегральных показателей;
- методика прошла всестороннее тестирование и продемонстрировала высокую эффективность;
- с помощью предложенного метода идентифицированы параметры сосновой пыли, образующейся при сверлении.

Таблица 2

Результаты восстановления неизвестной функции распределения

N	Задано			Определено		Результат
	Вид распределения	a	M	Вид распределения	a	
1	$(-x^2 + a^2) \cdot \frac{3}{2}a$	7,62	106	$(-x^2 + a^2) \cdot \frac{3}{2}a$	6,49	+
2	$ax \frac{2}{a^3}$	314	301	$ax \frac{2}{a^3}$	298	+
3	$\begin{cases} \left(1 - \frac{x}{a}\right) \cdot \frac{1}{a} - \frac{1}{2a}, x < \frac{a}{2} \\ \left(\frac{x}{a^2} - \frac{1}{2a}\right) \cdot 4, x > \frac{a}{2} \end{cases}$	0,038	276	$\begin{cases} \left(1 - \frac{x}{a}\right) \cdot \frac{1}{a} - \frac{1}{2a}, x < \frac{a}{2} \\ \left(\frac{x}{a^2} - \frac{1}{2a}\right) \cdot 4, x > \frac{a}{2} \end{cases}$	0,043	+
4	$\frac{1}{a}$	200000	227	$\frac{1}{a}$	179241	+
5	$ax \frac{2}{a^3}$	9,12	201	$ax \frac{2}{a^3}$	9,43	+
6	$2 \cdot \frac{(-x+a)}{a^2}$	457	90	$2 \cdot \frac{(-x+a)}{a^2}$	448	+
7	$e^{\frac{-x}{a}} \cdot \frac{1}{a} \cdot \frac{e}{e-1}$	0,00073	24	$e^{\frac{-x}{a}} \cdot \frac{1}{a} \cdot \frac{e}{e-1}$	0,00086	+
8	$2 \cdot \frac{(-x+a)}{a^2}$	7,62	216	$2 \cdot \frac{(-x+a)}{a^2}$	7,94	+
9	$\frac{\pi}{2a} \cdot \sin \frac{x\pi}{a}$	6,28	73	$\frac{\pi}{2a} \cdot \sin \frac{x\pi}{a}$	5,11	+
10	$\frac{1}{a}$	1242	236	$\frac{1}{a}$	1319	+
11	$\frac{12}{a^3}x^3 - \frac{12}{a^2}x + \frac{3}{a}$	369	242	$\frac{12}{a^3}x^3 - \frac{12}{a^2}x + \frac{3}{a}$	349	+
12	$(-x^2 + ax) \cdot \frac{6}{a^3}$	1,00012	58	$(-x^2 + ax) \cdot \frac{6}{a^3}$	1,131	+
13	$ax \frac{2}{a^3}$	0,343	205	$ax \frac{2}{a^3}$	0,357	+
14	$2 \cdot \frac{(-x+a)}{a^2}$	17,071	309	$2 \cdot \frac{(-x+a)}{a^2}$	16,54	+
15	$ax \frac{2}{a^3}$	25	221	$ax \frac{2}{a^3}$	25,86	+
16	$\frac{\pi}{2a} \cdot \sin \frac{x\pi}{a}$	936	89	$\frac{\pi}{2a} \cdot \sin \frac{x\pi}{a}$	1112	+
17	$\frac{12}{a^3}x^3 - \frac{12}{a^2}x + \frac{3}{a}$	310	49	$\frac{12}{a^3}x^3 - \frac{12}{a^2}x + \frac{3}{a}$	267	+

Список литературы: 1. М.Г. Зиганшин Проектирование аппаратов пылегазоочистки. – М.: Экопресс, 1998. – 505 с. 2. J. Sauter Grassenbestimmung von Brennstoffteilchen // *Forschungsarbeiten auf dem Gebiete des Ingenieurwesens.* – 1926. – Heft 279. 3. J. Sauter Untersuchung der von Spritzvergasern gelieten Zerstoßung // *Forschungsarbeiten auf dem Gebiete des Ingenieurwesens.* – 1928. – Heft 312. 4. Minoux, M. *Mathematical Programming: Theory and Algorithms.* – New York: John Wiley, 1986. – 489 p.

УДК 621

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВИТАНИЯ РАЗНОРАЗМЕРНЫХ ЧАСТИЦ В ВЕРТИКАЛЬНО ОРИЕНТИРОВАННОМ ДИФFUЗОРЕ

Бараниченко В.В., Бедоидзе М.В., Гуменюк А.С., Русяков Д.В., Цымбалов Д.С.

(DSTU, Rostov-on-Don, Russia)

Tel: +7 (918) 8925329; E-mail: masha.bedoidze@gmail.com

Аннотация: Предложена информационная модель динамики пылевоздушной смеси в сепарационном диффузоре. Средствами компьютерной имитации выявлена эргодичность динамики пылевых частиц, исследовано влияние формы частиц на статистические свойства их ансамбля в аспирационном потоке.

Ключевые слова: Пылевоздушная смесь, динамика в воздушном потоке, математическое моделирование, компьютерная имитация.

В машиностроении и других отраслях хозяйства широко используется механическая обработка конструкционных материалов. Она обычно сопровождающаяся образованием стружки и технологической пыли, вредной для здоровья работников. Вред ее обусловлен двумя обстоятельствами: 1) попадая и оседая в легких, пылевые частицы уменьшают поверхность газообмена; 2) многие из используемых в промышленности материалов являются раздражителями или даже токсичны. Современное оборудование, применяемое для механической обработки материалов, характеризуется недостаточной эксплуатационной безопасностью (в части запылённости, шума и вибраций). Следовательно, защита персонала обрабатывающих производств от негативного воздействия технологической пыли, основанная на строгом научном подходе и выражающаяся в реализации высокоэффективных трудозащитных средств и мероприятий, является важной государственной задачей. Научной основой средств и мер защиты работников от пылевого загрязнения служат достоверные знания физико-химических свойств различных видов технологической пыли. Поэтому цель данного исследования – разработка методики компьютерной имитации движения пылевых частиц в неоднородном воздушном потоке и реализующего ее программного комплекса представляется актуальной.

Поскольку основу функционирования систем очистки воздуха циклонного типа составляет отличие аэромеханических свойств несущей и транспортируемой сред в гетерофазном потоке для проектирования аспирационного оборудования необходимы детальные знания как физико-механических свойств обеих фаз и особенностей их взаимодействия [1,2].

Движение газа. Математические модели движения сплошной среды (ММДСС) представляют собой систему трёх дифференциальных уравнений с частными производными (УЧП), выражающими законы сохранения вещества, импульса и энергии. Они являются результатом моментного осреднения транспортного уравнения (Больцмана) для ансамбля составляющих сплошную среду микрочастиц [3].

$$\mathbf{x} = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}$$

Независимыми переменными в ММДСС служат пространственная координата

$$U = \begin{pmatrix} u_x \\ u_y \\ u_z \end{pmatrix}$$

и время t , а зависимыми переменными – поля скорости $\{X \equiv x, U \equiv u_x \equiv u\}$, давления P и плотности ρ . В одномерном случае $\{X \equiv x, U \equiv u_x \equiv u\}$ эти уравнения имеют вид [3]:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u) = 0, \quad (1)$$

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial P}{\partial x} = 0, \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\rho u^2}{2} + \rho \varepsilon \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left[\rho u \left(\frac{u^2}{2} + \omega \right) \right] = 0, \quad (3)$$

где $\varepsilon = c \cdot T$ – удельная внутренняя энергия несущей среды, c – её теплоёмкость при постоянном объёме, T – абсолютная температура; $\omega = \varepsilon + \frac{P}{\rho}$ – т.н. тепловая функция.

Поскольку в уравнениях (1) - (3) переменных больше чем связей, для единственности решения их требуется замкнуть. Практически (1)-(3) замыкают добавлением уравнения состояния. Для газов это уравнение Менделеева – Клапейрона

$$P = \frac{\rho}{\mu} RT, \quad (4)$$

где μ – молекулярная масса газа (для воздуха $\mu = 0,029 \frac{\text{кг}}{\text{моль}}$); R – универсальная газовая постоянная.

Для однозначной разрешимости систему (1)-(4) следует снабдить краевыми условиями (КУ) – граничными и начальными. Однако даже в одномерном случае ММДСС не интегрируема аналитически. Также уравнения (1)-(4) не учитывают динамическую неустойчивость реальных течений, известную как турбулентность [4]. Поэтому моделирование реальных течений газа требует использовать приближённые численные алгоритмы, среди которых наиболее употребительны методы конечных разностей [5] конечных элементов [6].

Пылевые частицы в потоке газа. Попадающие в поток газа пылевые частицы в результате силового взаимодействия приходят в движение. Описать движение отдельной микрочастицы в потоке сплошной среды с заданными скоростью, плотностью и вязкостью позволяют уравнения Ньютона, которые в декартовой системе координат (рис. 1) имеют вид:

$$\frac{d^2}{dt^2} X_i(t) = \frac{1}{m_i} \cdot \sum_j F_{ij}, \quad (5)$$

где $X_i(t) = \begin{pmatrix} x_i(t) \\ y_i(t) \\ z_i(t) \end{pmatrix}$ и m_i – соответственно пространственное положение и масса i -й

частицы, $F_{ij} = F_{ij} \left(X_i(t), \frac{d}{dt} X_i(t), t \right)$ – силы различной (j -й) природы, действующие на i -ю частицу. Далее будем использовать обозначения $V_i(t) = \frac{d}{dt} X_i(t)$ для скорости и ускорения i -й частицы.

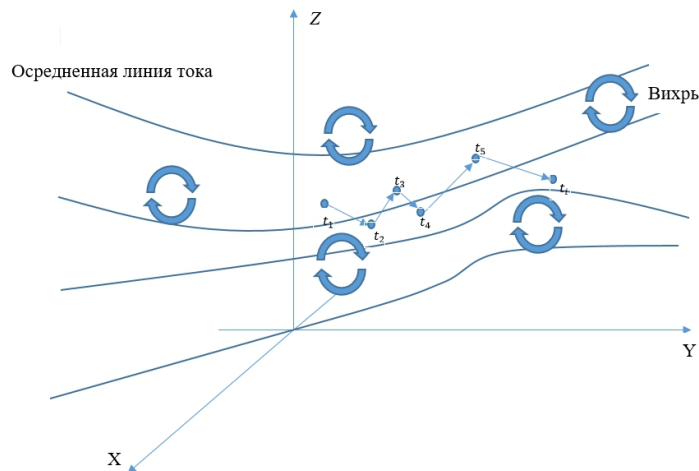


Рис. 1. Декартова система координат в описании взаимодействия твёрдых частиц с потоком газа

Применительно к условиям удаления пыли воздушным потоком уравнение динамики i -й частицы записывается как

$$m \frac{d\mathbf{v}}{dt} = -\mathbf{F}_R \quad (6)$$

где \mathbf{F}_R – сила сопротивления. Простейшей является ситуация, когда среда

неподвижна $\mathbf{v}_0 \equiv \mathbf{0}$. При малых установившихся скоростях имеет место ламинарное обтекание, и сила сопротивления пропорциональна скорости

$$\mathbf{F}_R = -k_1 \mathbf{v} \quad (7)$$

А при больших скоростях – квадрату скорости

$$\mathbf{F}_R = -k_2 \mathbf{v} |\mathbf{v}| \quad (8)$$

где S_1 – площадь поперечного потока сечения тела, k_1 и k_2 – числовые коэффициенты.

Для корректного математического описания динамики пылевых частиц в потоке при любом характере их обтекания средой следует надлежащим образом «сшить» зависимости (7) и (8). Такая операция выполнялась методами математического программирования с использованием доступных данных технического эксперимента. Ниже подробно описаны соответствующая техника и результаты.

Левую часть обобщённой зависимости $F_{сопр}(\mathbf{V})$ представим в виде

$$F_{сопр}(\mathbf{V}) = - [(k_1 / V)^\alpha + (k_2 V^2)^\alpha]^{1/\alpha} \cdot V/|V| \cdot S_1 \quad (9)$$

где α – положительная постоянная, характеризующая переход от ламинарного увлечения частиц потоком к турбулентному: чем больше величина α , тем уже переходная область. Величина S зависит от размеров тела и его ориентации в потоке.

Опираясь на экспериментальные данные по витанию различных мелкодисперсных сред в воздушном потоке, удалось получить явное выражение для скорости витания пылевой частицы u в зависимости от её диаметра d [см] и плотности ρ [кг/м³]

$$u = \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{1}{4}} \frac{k_1}{k_2} \left(\sqrt{1 + 4 \frac{k_2^4 \left(\frac{\rho d g}{6}\right)^4}{k_1^8} - 1} \right)^{\frac{1}{4}}, \quad (10)$$

или численно

$$u = 2,677 \cdot \left(\sqrt{1 + 3,911 \cdot 10^{-6} \cdot (\rho d)^4} - 1 \right)^{\frac{1}{4}}, \text{ м/с}. \quad (11)$$

Подстановка зависимости (11) в уравнения (6) позволяет замкнуть систему уравнений движения пылевых частиц в воздушном потоке.

Компьютерной имитация динамики микрочастиц в вертикальном диффузоре. Рассмотрим движение пылевых частиц в диффузоре. Это устройство принципиально позволяет достаточно качественно разделять сыпучие среды на фракции. Выберем диффузор в форме усечённого конуса, ось которого направлена вертикально вверх, угол раскрытия составляет α градусов, а большее сечение располагается сверху (рис. 2). Координатные оси выберем горизонтальной (x) и вертикальной (y).

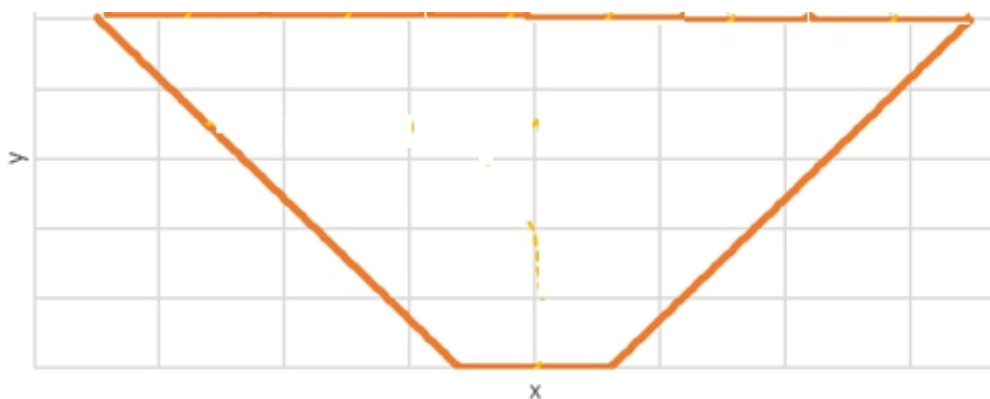


Рис. 2. Схема диффузора витания

В нижнюю часть диффузора поступает поток воздуха со скоростью v_0 . Задачу будем считать «плоской», а течение газового носителя турбулентным с равномерным профилем скорости в каждом сечении, который изменяется с высотой в соответствии с законом Бернулли

$$u_y(x, y) = \frac{u_{0y}(1 + \varepsilon \cdot \zeta)}{1 + (\operatorname{tg} \alpha \cdot [y])^2}, \quad u_x(x, y) = \frac{u_{0y} \cdot \varepsilon \cdot \zeta}{1 + (\operatorname{tg} \alpha \cdot [y])^2}, \quad (12)$$

где u_0 – начальная скорость потока, ε – коэффициент пульсации потока, ζ – случайная величина, равномерно распределённая в интервале $-0,5 \dots 5$.

Если микрочастицы поместить в нижнее сечение диффузора, они поднимутся с потоком на некоторую (соответствующую величине ρd) высоту и будет колебаться благодаря скоростным пульсациям потока и изменениям ориентации. Турбулентность также спровоцирует некоторое блуждание частиц в горизонтальном направлении.

Для отслеживания траектории отдельных частиц необходимо проинтегрировать систему уравнений с учетом столкновения отдельных элементов сыпучей среды как со стенками диффузора, так и между собой:

$$\begin{aligned} \frac{dx(t)}{dt} &= v_x(t), & x(0) &= 0 \\ \frac{dy(t)}{dt} &= v_y(t), & y(0) &= 0 \end{aligned},$$

$$\frac{dv_x(t)}{dt} = \frac{6}{\rho d} \left[\left\{ 16,3 \cdot (v_x(t) - u_x(x(t), y(t))) \right\}^2 + \left\{ 5,13 \cdot (v_x(t) - \right. \right.$$

(13)

$$\left. \left. \frac{dv_y(t)}{dt} = \frac{6}{\rho d} \left[\left\{ 16,3 \cdot (v_y(t) - u_y(x(t), y(t))) \right\}^2 + \left\{ 5,13 \cdot (v_y(t) - u_y(x(t), y(t))) \right\}^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right], \quad v_y(0) = 0$$

совместно с соотношениями (6), (12).

Результат численного интегрирования (6), (12), (13) явным методом Эйлера (другие методы не подходят вследствие разрыва в правой части этих уравнений вследствие стохастической природы турбулентности [4]) показан на рис. 3. Представленные данные свидетельствуют, что динамика одиночной частицы отвечает траектории выхода на равновесную высоту.

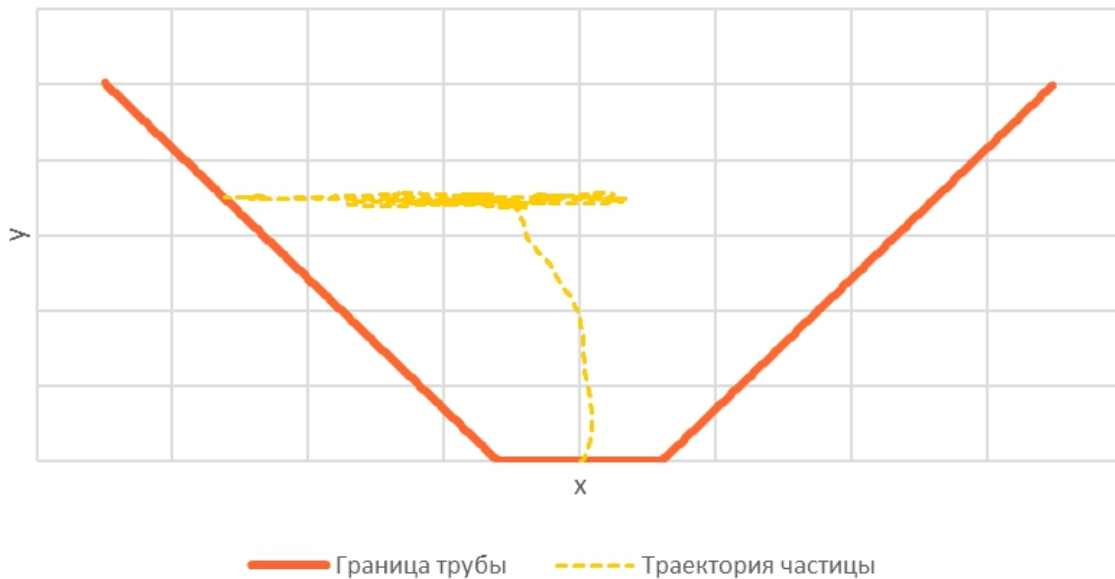


Рис. 3. Траектория движения отдельной частицы в сепарационном диффузоре

Динамика пылевоздушной смеси, однако, сложнее из-за не учтенных в модели (6), (12), (13) обстоятельств: 1) частицы не сферы, их ориентация постоянно меняется; 2) происходят столкновения частиц между собой и со стенками диффузора; 3) при увеличении плотности частиц уменьшается сечение диффузора, и увеличивается скорость потока; 4) течение среды трехмерно, 5) вертикальная составляющая скорости неоднородна по сечению. Роль перечисленных процессов зависит от ряда факторов и требует анализа в каждой конкретной ситуации. Здесь приведем лишь постановки и результаты сценарных компьютерных экспериментов, выявляющие основные закономерности течения пылевоздушной среды в диффузоре.

Будем рассматривать упруго сталкивающиеся между собой и со стенками частицы в форме параллелепипедов со сторонами $-d_x \leq d_y \leq d_z$. Формулы для площади S и V объема частиц имеют вид:

$$S = 2(d_x d_y + d_x d_z + d_y d_z) \quad (14)$$

$$V = d_x \cdot d_y \cdot d_z \quad (15)$$

На движение частицы влияет проекция ее сечения на плоскость, перпендикулярную местной скорости потока S_1 . Чтобы описать вращение частицы вместо величины d в уравнениях (14)-(15) используем отношение V/S_1 , соответствующее случайной ориентации частицы в пространстве на каждом шаге интегрирования.

Анализ свойств гетерогенного потока требует проверить эргодичность [4], т.е. возможность судить о динамике всей совокупности частиц по истории одной из них. Формировался ансамбль из 10 одинаковых частиц в форме шара и выполнялся имитационный эксперимент на временном интервале $0 - t_{max} = 10 \text{ с}$ при шаге интегрирования. Выбранные параметры позволяют приблизить дискретизированную задачу к непрерывной и наблюдать за частицами достаточно долго. По результатам компьютерной имитации построим графики функций распределения двух величин: вертикальной координаты случайно выбранной частицы после каждого шага интегрирования (рис. 4, слева) и положения каждой частицы из десяти рассматриваемых в конечный момент времени (рис. 4, справа). Хорошее согласие функций распределения, так и их интегральных характеристик (в левых верхних углах рис. 4) свидетельствует в пользу эргодичности моделируемой системы.

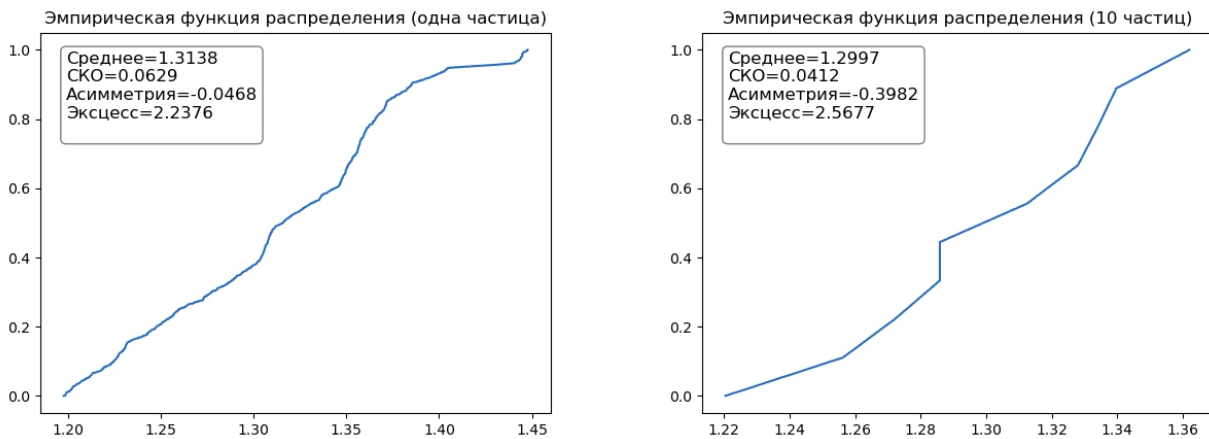


Рис. 4. Результат проверки динамики ансамбля пылевых частиц на эргодичность

Имитационный эксперимент также показал, что степень эргодичности совокупной динамики дисперсной среды увеличивается при стремлении ансамбля частиц к равноразмерному.

При исследовании динамики пылинок неправильной формы расчетным путем установлено, что при увеличении соотношения сторон частицы $\frac{D}{d}$ увеличивается равновесная высота витания в диффузоре. Это связано с тем, что при определенном положении частицы неправильной формы площадь сечения, перпендикулярного потоку, возрастает, что сопровождается увеличением подъемной силы. При этом частицы с большим отношением $\frac{D}{d}$ сильнее блуждают по высоте в окрестности равновесного значения, что сходно с динамикой частиц разного размера.

Как свидетельствует выполненный нами предварительный аэродинамический анализ аспирационного процесса, конкретизация постановок задачи требует детальных знаний как динамики воздушного потока, так и геометрических свойств технологической пыли. Последние сводятся к статистике реальной геометрии (формы и размера) частиц.

Резюме. Для понимания особенностей движения пылевых частиц в воздушном потоке сконструированы и исследованы три простые модели динамики (движения частиц в однородных ламинарном и турбулентном потоках, а также движения в сепарационном диффузоре). Путем компьютерных экспериментов установлена эргодичность динамики ансамблей взаимодействующих между собой пылевых частиц, а также исследовано влияние формы частиц на статистические свойства их распределения в неоднородном потоке вертикального диффузора. Выявлена возможность заменять ансамбль частиц различной формы ансамблем шаровых частиц при соответствующей корректировке статистики размерных показателей.

Список литературы: 1. Smith, Joseph L. Experimental and analytical study of the vortex in the cyclone separator / PhD Thesis, Massachusetts Institute of Technology, Dept. of Mechanical Engineering, 1959. 133 p. 2. Rhodes M. (1998). Introduction to particle technology. John Wiley and Sons. 3. Седов Л. И., Механика сплошной среды, т. 1-2, М., 1970. 4. Колесниченко А.В., Маров М.Я. Турбулентность и самоорганизация. Проблемы моделирования космических и природных сред. М.: Издательство "Лаборатория знаний", 2020. 651 с. 5. Четверушкин Б.Н. Кинетические схемы и квазигазодинамическая система уравнений. — М.: МАКС Пресс, 2004. — 328 с. 6. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике — М.: Мир, 1975.

УДК 621

ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕОМЕТРИИ ПЫЛИ, ОБРАЗУЮЩЕЙСЯ ПРИ ОБДИРОЧНО-ШЛИФОВАЛЬНОЙ ОБРАБОТКЕ ЧУГУНА

Бедоидзе М.В., Гуменюк А.С., Купцова И.С., Милев И.Ю., Русяков Д.В.

(ДГТУ, г. Ростов-на-Дону, Россия)

Тел: +7 (951) 8475165; E-mail: oleg_v_yatcenko@mail.ru

Abstract: A mathematical analysis of the metal dust size distribution with respect to LALLS-technique is performed. It is found that dust investigated obeys the five-parametric distribution. The error in size distribution determination is estimated.

Пыль, образующаяся при обдирочно-шлифовальной обработке металлов, не только снижает качество обработки, но вредит здоровью человека и загрязняет природную среду. Для предотвращения негативного воздействия используют различные аспирационные системы [1], эффективность которых достигается предварительным аэродинамическим расчетом. Основу последнего составляют законы аэромеханики и геометрия улавливаемых частиц. Поэтому знания геометрии технологической пыли актуальны для целей эффективного пылеулавливания.

Целью данного исследования ставилась разработка математических методов для корректного определения размерно-массовых параметров чугунной пыли, образующейся в процессе обдирки-шлифования. Результаты предполагается использовать для нормализации воздушной среды в металлообрабатывающих цехах.

Первичный анализ размерных характеристик металлической пыли удобно проводить с помощью LALLS-аппаратуры. Соответствующие результаты выводятся в виде интегральной и дифференциальной функций распределения (рис. 1), а также как набор некоторых интегральных показателей (рис. 2).

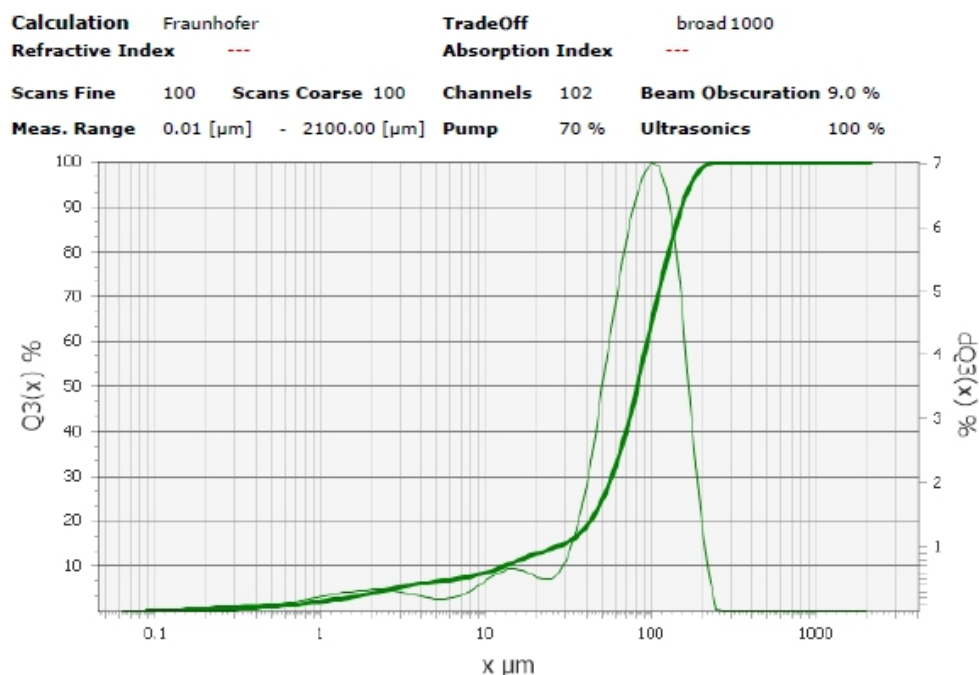


Рис. 1. Распределение частиц чугуна по размерам

Приведенное на рис. 1 распределение относится к т.н. многомодальным. Если каждая мода (из трех в данном случае) характеризуется единственным параметром, а еще два отвечают за вклад мод в общее распределение, оказывается, что моментных данных, приведенных на рис. 2, существенно недостаточно для уверенной параметрической идентификации совокупной функции распределения. Ситуацию позволяет исправить прием, известный как регуляризация – т.е. использование априорных сведений о характере анализируемого распределения. Известно, что при пылеобразовании путем однократного отщепления от макро-образца должны получаться частицы, размер которых подчиняется экспоненциальному распределению. В нашем случае логично предположить сочетание трех параллельно действующих механизмов однократного отщепления с различным характерным размером отделяемых частиц.

Arithmetic Mean	84.31 μm	Span	(d90-d10)/d50	1.69	D[4,3]	84.3 μm
Geometric Mean	57.78 μm	Mean/Median	0.97			
Quadratic Mean	97.72 μm	Mode	102.89 μm			
Spec.Surface	5,602.0 cm ² /cm ³	Median	81.792 μm			
d10	0.20 μm	Span	(d90-d10)/d50	1.69	D[4,3]	84.3 μm
Geometric Mean	57.78 μm	Mean/Median	0.97			
Quadratic Mean	97.72 μm	Mode	102.89 μm			
Spec.Surface	5,602.0 cm ² /cm ³	Median	81.792 μm			

Рис. 2. Интегральные характеристики распределения частиц чугуна по размерам

Математически такая модель выражается формулой:

$$p(x, D_1, D_2, D_3, \alpha_2, \alpha_3) = \frac{1 - (\alpha_2 + \alpha_3)}{D_1} \cdot e^{-\frac{x}{D_1}} + \frac{\alpha_2}{D_2} \cdot e^{-\frac{x}{D_2}} + \frac{\alpha_3}{D_3} \cdot e^{-\frac{x}{D_3}}, \quad (1)$$

где $D_1 - D_3$ характерные размеры частиц во фракциях, а α_2 и α_3 – доля частиц, принадлежащих ко второй и третьей фракциям соответственно.

Особенности прибора *FRITSCH Analysette 22* в том, что на выход поступают значения

$$Q(x) = \frac{\int_0^x p(x, D_1, D_2, D_3, \alpha_2, \alpha_3) x^4 dx}{\int_0^\infty p(x, D_1, D_2, D_3, \alpha_2, \alpha_3) x^4 dx} = \frac{\int_0^x p(x, D_1, D_2, D_3, \alpha_2, \alpha_3) x^4 dx}{24((1 - (\alpha_2 + \alpha_3))D_1^4 + \alpha_2 D_2^4 + \alpha_3 D_3^4)} \quad (2)$$

и

$$P(x, D_1, D_2, D_3, \alpha_2, \alpha_3) = \frac{p(x, D_1, D_2, D_3, \alpha_2, \alpha_3) x^4}{24((1 - (\alpha_2 + \alpha_3))D_1^4 + \alpha_2 D_2^4 + \alpha_3 D_3^4)}, \quad (3)$$

существенно отличные от интересных для наших целей $p(x)$ и $F(x)$. Нахождение параметров модели $D_1 - D_3$, а также α_2 и α_3 в такой ситуации сводится к оптимизационной задаче [2]:

$$Q(D_1, D_2, D_3, \alpha_2, \alpha_3) \equiv \sum_{i=1}^{\infty} (\lg(Q(x_i)) - \lg Q_i)^2 \rightarrow \min, \quad (4)$$

где x_i – размер частиц Q_i – доля частиц с размером меньшим или равным x_i .

Практическое найти искомые параметры модели можно двумя способами. Первый состоит в решении переопределенной системы уравнений

$$\begin{cases} \lg(Q(x_i)) - \lg Q_i = 0 \\ i = 1, 2, 3 \dots \end{cases}, \quad (5)$$

а второй – в решении системы отвечающей необходимому условию экстремума [3].

Однако реализация обоих алгоритмов затруднена спецификой интеграла в числителе (2). Стандартная процедура Рунге – Кутты оказывается непригодной для численного взятия интеграла в столь широких пределах. Проблему удалось решить, вычислив Q аналитически и получив результат в замкнутом виде:

$$\begin{aligned} Q(x, D_1, D_2, D_3, \alpha_2, \alpha_3) = & (1 - (\alpha_2 + \alpha_3)) \left(1 - \frac{(24D_1^3 x + 24D_1^4 + 12D_1^2 x^2 + 4D_1 x^3) e^{-\frac{x}{D_1}}}{24D_1^4} \right) + \\ & + \alpha_2 \left(1 - \frac{(24D_2^3 x + 24D_2^4 + 12D_2^2 x^2 + 4D_2 x^3) e^{-\frac{x}{D_2}}}{24D_2^4} \right) + \\ & + \alpha_3 \left(1 - \frac{(24D_3^3 x + 24D_3^4 + 12D_3^2 x^2 + 4D_3 x^3) e^{-\frac{x}{D_3}}}{24D_3^4} \right) \end{aligned} \quad (6)$$

После этого, процедуры (5)-(6) приобретают устойчивость и позволяют получить решение. Его свойства таковы, что подавляющее большинство частиц относятся к мелкой фракции, доли процента к средней и лишь ничтожная часть – к крупной. Результат в виде синтезированной дифференциальной функции распределения $p(x)$ приведен на рис. 3. Количественное отличие от первичных данных рис. 1 связано с отсутствием в данных рис. 3 надлежащей нормировки.

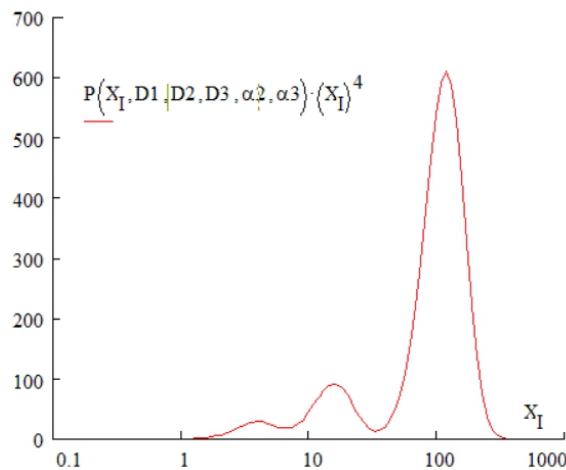


Рис. 3. Распределение частиц чугуна по размерам: синтезированная дифференциальная функция распределения

Результаты выполненных авторами исследований сводятся к следующему:

- предложен метод идентификации многомодальных распределений пылевых частиц по размеру;
- методика успешно апробирована на трехфракционных образцах чугунной пыли, полученной в процессе обдирочно-шлифовальной обработки;
- предложенная методика идентификации функции распределения дорабатывается авторами в целях автоматизации анализа размерных характеристик технологической пыли.

Список литературы: 1. М.Г. Зиганшин Проектирование аппаратов пылегазоочистки. – М.: Экопресс, 1998. – 505 с. 2. Minoux, M. Mathematical Programming: Theory and Algorithms. – New York: John Wiley, 1986. – 489 p.

УДК 621

ПОДГОТОВКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПОВЫШЕНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ШЛИФОВАНИЯ ИЗДЕЛИЙ ИЗ КАМНЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ УЗК

Горобец И.А., Рудой Е.Р. (каф. ТМ, ГОУВПО «ДОННТУ», Донецк)

Аннотация: Проведение экспериментальных исследований содержит ряд последовательных действий и расчётов. Разработан план, основанный на принципах полнофакторного эксперимента, выявлены факторы факторного пространства и диапазон их варьирования. Обработка результатов экспериментальных исследований предусматривает использование принципов оценки статистических данных по сравнению выборочных средних величин съёма слоя обрабатываемого материала и производительности шлифования.

Ключевые слова: эксперимент, шлифование, планирование, обработка, оборудование, методы, оценка, производительность.

Целью проведения экспериментальных исследований является доказательство повышения производительности обработки шлифования гранита с использованием ультразвуковых колебаний (УЗК). Задачами проведения эксперимента являются: выбор методов и средств проведения исследований; планирование эксперимента; обоснование методов обработки полученных экспериментальным путём данных; проведение анализа полученных экспериментальным путём данных.

В качестве методов проведения эксперимента принята тензометрия процессов шлифования природного камня. Средствами проведения экспериментальных исследований являются

- модернизированный вертикально-фрезерный станок модели 6М13П лаборатории кафедры [1];
- алмазный круг АГШГ Д160 мм АС50 400/315 М6-14.50% ТУ 88 Украины 90. 513-81 производства ИСМ НАНУ, рис.1, 2;
- специальная головка для установки торцевого шлифовального инструмента и подачи СОЖ через центральное отверстие шлифовального круга [1], рис.3;
- специальное измерительное устройство на базе индикатора часового типа [1], рис.4;

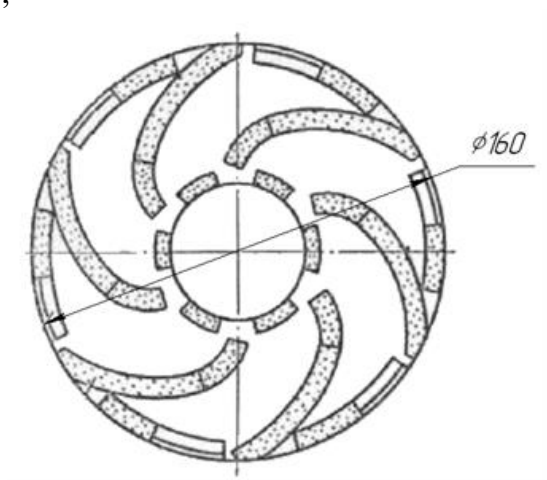


Рис 1. Схема конструкции алмазного круга АГШГ



Рис 2. Вид алмазного круга АГШГ

- измерительный комплекс на базе тензометрического усилителя ТА-5, аналого-цифрового преобразователя Рісо ADC-16 и персонального компьютера со специальным программным обеспечением на базе приложения MS Excel, рис.5;



Рис.3. Вид специальной головки для установки торцевого шлифовального инструмента и подачи СОЖ



Рис.3. Вид специального измерительного инструмента

- комплект специального вибростола, генератора УЗК модели УЗГ1-1 и преобразователя УЗК модели ПНС 1-1, рис. 6.



Рис.4. Вид измерительного комплекса



Рис.5. Вид генератора модели
УЗГ1-1



Рис.6. Вид преобразователя модели
ПНС 1-1

Планирование проведения эксперимента является одним из важных этапов исследований, необходимым для определения представительности выборки из всей генеральной совокупности возможных вариантов, количества проведения опытов, на основе вероятностной оценки получения достоверных результатов, количество повторений опытов, граничных значений факторов факторного пространства эксперимента, вида плана проведения исследований [2, 3, 4].

В качестве представительной выборки для проведения экспериментальных исследований принят гранит Корнинского месторождения (твёрдость 210 МПа, плотность $2,62 \div 2,82 \text{ г/см}^3$).

Количество опытов определим по формуле [3,4]:

$$n = \frac{t_c^2 \cdot S^2 + \varepsilon^2}{\varepsilon^2}, \quad (1)$$

где t_c - аргумент функции Стьюдента [4], для заданных условий $t_c = 2,1$; S - среднее квадратическое отклонение; ε - точность измерений.

Для уровня доверительной вероятности $p = 0,95$ и точности измерений $\varepsilon = 1,5$ мкм получим:

$$n = \frac{2,1^2 \cdot 1,7^2 + 1,5^2}{1,5^2} = 6,7 \approx 7$$

Количество повторов измерений принимается равной $n=7$. В результате статистической обработки данных определена величина среднего квадратического отклонения - 1,7 мкм.

Вид плана проведения эксперимента – полный факторный эксперимент (ПФЭ). Во время шлифования поверхности заготовки из гранита, изделие обрабатывается двойными ходами на разных режимах резания. В качестве изменяемых факторов факторного пространства приняты подача S , частота вращения шпинделя n (скорость главного движения V) и глубина шлифования t . Значения этих факторов принято изменять от минимума до максимума с промежуточным значением в середине интервала каждого из факторов. Выходные величины эксперимента: величина съёма материала h .

Уровнями варьирования факторов приняты:

- n , частота вращения шпинделя – 1600 об/мин;
- S , подача: 400; 630; 800 мм/мин;

– t , величина припуска: 0,4; 0,6; 0,8 мм.

Эксперимент проводится в 2 этапа: без применения и с применением УЗК вибростола. Подробная методика проведения подобных экспериментов по обработке камня приведена в [5].

Методы обработки результатов экспериментальных данных основаны на известных статистических зависимостях, изложенных в [3-5] и заключаются в сравнении двух выборочных средних производительности обработки заготовки шлифованием. Так, в результате замеров производительности традиционным способом шлифования камня и усовершенствованным (путём использования УЗК) получены две выборки. Первая – число замеров n_1 ; математическое ожидание \bar{x}_1 ; дисперсия S_1^2 . Вторая – число замеров n_2 ; математическое ожидание \bar{x}_2 ; дисперсия S_2^2 . При этом $\bar{x}_1 \neq \bar{x}_2$. Ставится вопрос: можно ли утверждать, что различие между \bar{x}_1 и \bar{x}_2 значимо? Иными словами, можно ли утверждать, что использование вибростола с генератором УЗК дало положительные результаты?

Обозначим

$$\bar{x}_1 - \bar{x}_2 = Z \quad (2)$$

Z будет значимой величиной, если выйдет за пределы доверительного интервала

$$\mu_z - t_\alpha S_z \leq Z \leq \mu_z + t_\alpha S_z. \quad (3)$$

Предположим, что различие между \bar{x}_1 и \bar{x}_2 незначимо, т.е.

$$\mu_z = 0 \quad (4)$$

Тогда доверительный интервал

$$Z = \pm t_\alpha S_z \quad (5)$$

Но

$$S_z^2 = \left(\frac{\partial Z}{\partial x_1} \right)^2 \cdot S_{x_1}^2 + \left(\frac{\partial Z}{\partial x_2} \right)^2 \cdot S_{x_2}^2, \quad (6)$$

тогда

$$S_z^2 = S_{x_1}^2 + S_{x_2}^2; \quad (7)$$

так как

$$S_x^2 = \frac{S_x^2}{n}, \quad (8)$$

то

$$S_z^2 = \frac{S_{x_1}^2}{n_1} + \frac{S_{x_2}^2}{n_2} \quad (9)$$

Если $S_{x_1}^2$ и $S_{x_2}^2$ однородны, а только в этом случае можно сравнить \bar{x}_1 и \bar{x}_2 , то

$$S_z^2 = S_{CB}^2 \left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} \right) \quad (10)$$

или

$$S_z = S_{CB} \sqrt{\frac{n_1 + n_2}{n_1 n_2}} \quad (11)$$

Таким образом, доверительный интервал

$$Z = \pm t_{\alpha} S_{CB} \sqrt{\frac{n_1 + n_2}{n_1 n_2}} \quad (12)$$

Критерий t_{α} берётся для соответствующего уровня значимости и числа степеней свободы [4].

$$f = n_1 + n_2 - 2 \quad (13)$$

Для получения 2D и 3D графиков величины съёма материала в зависимости от подачи S и глубины шлифования t возможно использование специализированного ПО Matlab.

Выводы. Для проведения экспериментальных исследований разработан план, основанный на принципах полнофакторного эксперимента, определены факторы и диапазон их варьирования. Обработка результатов экспериментальных исследований реализована известными принципами оценки статистических данных по сравнению выборочных средних величин съёма слоя обрабатываемого материала и производительности шлифования.

Список литературы: 1. Михайлов, А.Н. Экспериментальная установка для исследования процессов шлифования изделий из природного камня / А.Н.Михайлов, И.А.Горобец, А.В.Байков, Н.В.Голубов, А.Л.Ищенко // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Машинобудування і машинознавство. Вип.71. – Донецьк: ДонНТУ, 2005. – с.164 – 174. 2. Болтян, А.В. Прогнозирование и оценка параметров продукции: Учебное пособие / А.В. Болтян., И.А. Горобец – Донецк: ДОННТУ, 2010.- 146с. 3. Болтян, А.В. Теория инженерных исследований: учебное пособие / А.В.Болтян, И.А.Горобец (издание 3-е переработанное и дополненное ISBN 966-8085-80-9) – Донецк: ДонНТУ, 2011.- 172с. 4. Рыжов, Э.В. Математические методы в технологических исследованиях/ Э.В.Рыжов, О.А. Горленко – Киев: Наук. думка, 1990. – 184 с. 5. Горобец, И.А. Методика экспериментальных исследований процесса шлифования изделий из камня / И.А.Горобец, А.Н.Михайлов // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научных трудов. – Донецк: ООО «Лебедь», 2004. Вып. 27. С. 82-88.

УДК 621

ВЫБОР СТРУКТУРНОЙ СХЕМЫ КОНСТРУКЦИИ 3D-ПРИНТЕРА

Горобец И.А., Лахин А.М., Киселица Д.О., Жарких Д.С.
(каф. ТМ, ГОУВПО «ДОННТУ», Донецк)

Аннотация: Рассмотрены вопросы выбора рациональной структурной схемы конструкции принтера для 3D-печати. Исследованы параметры механизмов параллельных структур. Даны рекомендации использования вариантов схем параллельных структур при синтезе конструкции 3D - принтеров.

Ключевые слова: принтер, технологии, структура, параметры, схема.

Идея аддитивного изготовления (или 3D-печати) объекта основана на концепции построения изделия последовательно наносимыми слоями, отображающими контуры объекта, с использованием цифровой модели создаваемого изделия. При этом, каждый из наносимых слоёв материала увеличивает объем и вес изготавливаемой заготовки. В пятёрке передовиков внедрения аддитивных технологий находятся Япония, Германия, Китай и Великобритания. В России такие технологии используются на известных фирмах: ФГУП «НАМИ», НПО «Салют», АБ «Универсал», НИИ «Машиностроительные Технологии» [1,2].

Для реализации аддитивных технологий в 3D- принтерах чаще всего используются структуры картезианского типа, основанные на возможности линейного перемещения экструдера в трёх измерениях [3]. Однако, существуют и другие типы конструкции, например, использующие принцип параллельных структур [4,5]. С целью отыскания наилучшего решения схемы конструкции 3D-принтера для повышения его производительности и точности, рассмотрим вероятные структурные схемы на основе параллельных структур.

Структурные схемы механизма 3D-принтера состоят из простых кинематических пар, какими являются: R – вращательная пара, P – поступательная пара, S – шаровой шарнир, C – цилиндрическая пара, H – винтовая пара, U – карданное соединение. Каждая простая кинематическая пара имеет определённое количество степеней свободы [6]. Основными типами пространственных параллельных устройств с кинематическими структурами, обеспечивающими три степени свободы, являются устройства, которые имеют или один активный поступательный шарнир в кинематической цепи, или один активный вращательный шарнир.

Принцип действия параллельных устройств с активным поступательным шарниром основан на изменении положения подвижной платформы при изменении длин звеньев с помощью поступательных кинематических пар. Структуры, содержащие активную поступательную пару, в свою очередь, подразделяются на две группы, со звеньями постоянной длины и со звеньями переменной длины. К таким механизмам относятся устройства с UPU-, SPS-, UPS-, SPU-, PUU-структурами (рис. 1).

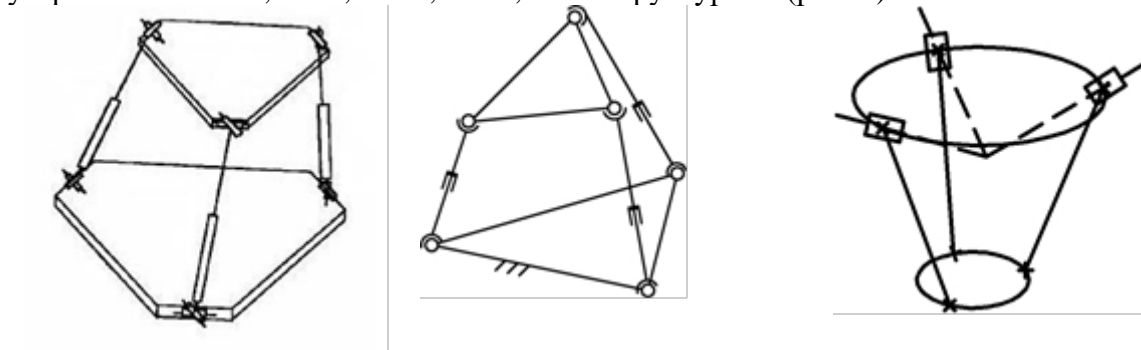


Рис.1 Структурные схемы UPU-, SPS-, PUU- устройств.

Устройства со структурой UPU-, SPS-, UPS- и SPU имеют кинематические звенья пар переменной длины. Длина цепи варьируется с помощью призматической кинематической пары. Принцип действия таких устройств основан на зависимости положения подвижной платформы относительно неподвижной, от длины каждого из звеньев кинематической пары. Устройство со структурой PUU имеет кинематические звенья постоянной длины. Положение подвижной платформы относительно неподвижной изменяется с помощью линейных приводов, которые также являются кинематическими поступательными парами.

Устройства с вращательным активным шарниром называют Delta –структурами. Устройство состоит из трёх рычагов, прикрепленных посредством карданных шарниров к неподвижной платформе. Особенностью схемы конструкции является использование параллелограммов, что позволяет сохранять пространственную ориентацию исполнительного механизма, рис. 2 а.

Параллельной кинематической структурой обладает и конструкция Tricept, Схема конструкции такого устройства состоит из четырёх кинематических звеньев, включая три идентичные активные пары и одно пассивное звено, соединяющее неподвижную основу с движущейся платформой. Каждая активная кинематическая пара содержит карданный шарнир, установленный на неподвижной платформе, изменяемое по длине звено с приводимым в движение призматическим шарниром и сферическим шарниром, прикрепленным к движущейся платформе. При этом, пассивное кинематическое звено в виде телескопической трубы, находится в середине конструкции устройства для ограничения движения платформы только тремя степенями свободы, рис.2 б.

Структура параллельного механизма Orthoglide, состоит из трёх параллельных идентичных кинематических пар. Активными шарнирами устройства являются три ортогональных призматических шарнира. Подвижная платформа связана с призматическими шарнирами с помощью трёх параллелограммов. Таким образом, конструкция может совершать только поступательные перемещения. Особенностью этой структуры является отсутствие возможности столкновений звеньев устройства, рис.2 в.

Выбор рациональной структурной схемы конструкции 3D- принтера на основе структуры параллельных механизмов, является сложной задачей, решение которой должно быть обусловлено многими факторами и критериями оценки.

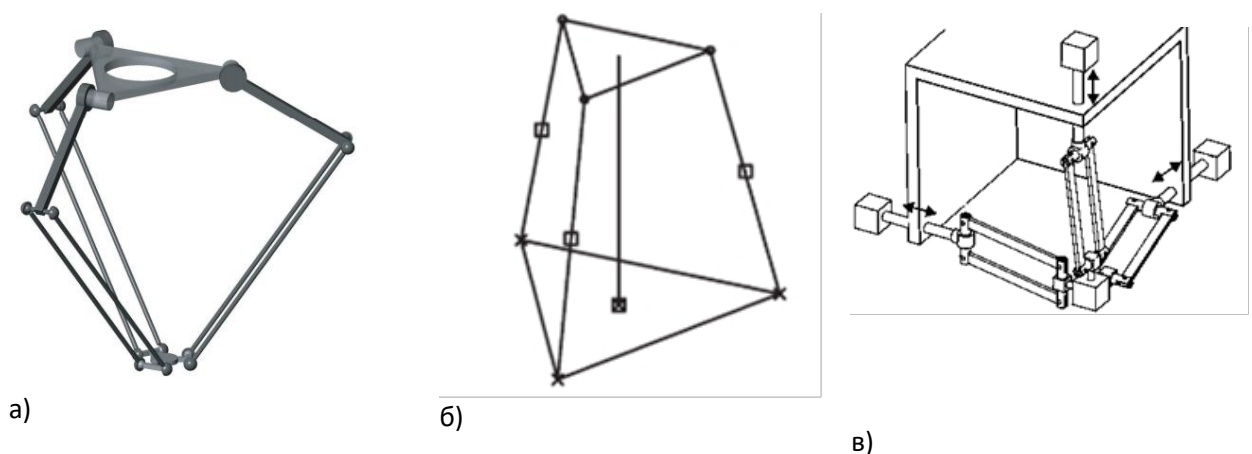


Рис.2 Структуры: а) Delta, б) Tricept и в) Orthoglide, соответственно

Наиболее весомыми критериями оценки пригодности параллельной структуры механизма для использования в конструкции 3D-принтера, табл.1, являются:

- количество и сложность кинематических пар,
- количество приводов,
- реализуемое количество степеней свободы,

- сложность решения обратной и прямой задачи кинематики,
- динамические характеристики,
- система управления,
- скорость работы 3D-принтера,
- реализуемая рабочая зона,
- сложность структуры,
- отношение рабочей зоны 3D-принтера к объёму, занимаемому его конструкцией и пр.

Табл. 1 Критерии и оценки возможных структур робота

Критерий оценки / Вариант структуры	3- UPU	3- SPS	3- PUU	Delta	Tricept	Orthoglide
количество кинематических пар	9	9	9	9	10	9
сложность кинематических пар	15	21	15	9	17	9
количество приводов	3	3	3	3	3	3
количество степеней свободы	3	3	3	3	3	3
обратная задача кинематики	9	8	8	9	9	8
прямая задача кинематики	7	10	6	8	8	6
динамика	10	8	8	8	8	8
управление	9	10	8	9	8	8
скорость	8	8	7	6	10	8
рабочая зона	6	6	6	7	8	10
сложность структуры	7	7	7	9	10	8
рабочая зона / конструкция	7	7	6	7	8	10
Итого	93	100	86	87	102	90

Из анализа результатов табл.1, можно сделать вывод о минимальных значениях суммарных численных параметров в структурах 3-PUU и Delta, которые можно рекомендовать для реализации кинематики механической части 3D-принтера с тремя степенями свободы. Структуры Tricept и 3-SPS содержат более сложные кинематические пары, а структура Orthoglide - имеет относительно небольшую рабочую зону.

Выводы. Использование новых технологий получения изделий машиностроения является актуальной задачей современной промышленности. Одной из реализаций новейших подходов решения таких задач являются аддитивные технологии. Исследования схем конструкций технологического оборудования аддитивных технологий выявили особенности кинематических структур механической части 3D-принтеров. Рассмотрены актуальные схемы высокоточных и производительных параллельных структур, кинематики механической части технологического оборудования для реализации аддитивных технологий. Дан анализ параллельных кинематических структур 3D-принтеров и предложены их наилучшие решения в виде структур 3-PUU и Delta.

Список литературы: **1.** Носков, О. Еще раз догнать Америку [Электронный ресурс] – М.: Академгородок – 2017. — Режим доступа: <https://academcity.org/content/eshche-raz-dognat-ameriku> **2** Сферы применений аддитивных технологий [Электронный ресурс] - М.: Изд. Эра 3D,- 2017. — Режим доступа:<https://era-3d.ru/baza-znaniy/poleznaya-informatsiya/sfery-primeneniya-additivnykh-tehnologiy> **3.** Горобец, И.А. Методы и применимость аддитивных технологий в машиностроении / И.А. Горобец, Н.В.Голубов, А.М.Лахин, Д.О.Киселица, Д.С.Жарких/ ИНЖЕНЕР: студенческий научно-технический журнал. – Донецк, ДонНТУ, 2021. - № 2(31). С. 43-49. **4.** Merlet J.-P. “Parallel Robots. Second Edition.” – Springer, 2006 **5.** Raza Ur-Rehman. Multiobjective Optimization of Parallel Robots and Optimal Path Placement. Robotics - Ecole Centrale de Nantes (ECN), 2009. **6.** Тимофеев, Г.А. Теория механизмов и машин: учебник и практикум для прикладного бакалавриата/ Г.А.Тимофеев – М.: Изд. «Юрайт», 2019 – 368с.

УДК 621

ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МУЛЬТИМОДАЛЬНЫХ ПОКРЫТИЙ, НАНЕСЕННЫХ ЛАЗЕРНОЙ НАПЛАВКОЙ, В УСЛОВИЯХ СУХОГО ТРЕНИЯ

Девойно О.Г., Кардаполова М.А., Луцко Н.И., Пилецкая Л.И., Артюкевич А.В.

(БНТУ, г. Минск, Республика Беларусь)

Тел./Факс: +375 (17) 3310045; E-mail: scvdmmed@bntu.by

Abstract: The article investigates the tribological properties of laser-deposited 2D and 3D multimodal coatings from dissimilar materials under dry friction conditions. The dependences of the wear rate of multimodal and homogeneous coatings on the laser cladding rate and the tracks deposition step are given. It has also been shown that multimodal coatings under dry friction conditions have a sufficiently high wear resistance, and the wear resistance of a cheap 3D multimodal coating is equal to the wear resistance of an expensive nickel-based self-fluxing alloy coating.

Key words: Laser cladding, multimodal coatings, tribological properties, wear rate, coefficients of friction.

Современные машины и механизмы характеризуются в большинстве случаев наличием высоких скоростей и нагрузок. Поэтому растет потребность в композиционных материалах, которые позволяют значительно увеличить износостойкость, в том числе растет потребность в нанесении композиционных упрочняющих покрытий. В последнее время появился новый вид композиционных покрытий, так называемые мультимодальные покрытия, которые показывают особенно высокие физико-механические свойства [1, 2]. Модой является значение любого признака (размера частиц упрочняющей фазы, величины пористости, элементного состава материала), которое встречается наиболее часто. Если встречаются несколько значений какого-либо признака, имеющие одинаковую частоту повторения, то покрытие считается мультимодальным.

Процесс лазерной наплавки характеризуется валиками небольших размеров, минимальным тепловым вкладом в прилегающие области покрытия и подложку, низкой диффузией материала покрытия в подложку, но, в то же время, высокой прочностью сцепления наплавленных валиков с подложкой и между собой [3].

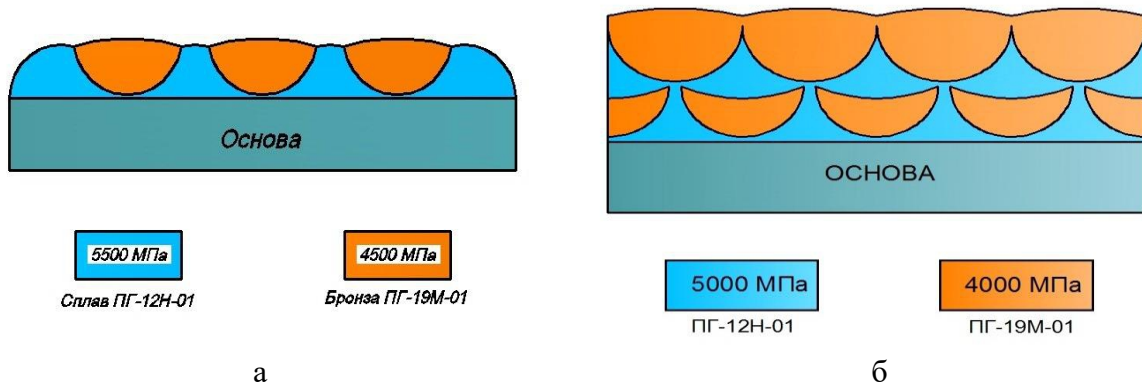


Рис. 1. Схемы поперечного сечения 2D (а) и 3D (б) мультимодальных покрытий

Приведенные свойства лазерной наплавки позволяют использовать ее для построения мультимодальных покрытий. Могут быть получены мультимодальные

покрытия, состоящие из полосчатых слоев, нанесенных чередованием материалов, обладающих разнородными физико-механическими свойствами. Авторами статьи разработана технология нанесения мультимодальных покрытий путем послойного чередования валиков из самофлюсующегося сплава на основе никеля ПГ-12Н-01 и бронзы ПГ-19М-01. При этом чередование валиков может быть как послойно (рисунок 1а) в однослойном 2D покрытии, так и между слоями (рисунок 1б) – в двухслойном 3D покрытии. Такая технология построения мультимодальных покрытий может быть использована как для упрочнения поверхностей новых деталей, так и для восстановления изношенных поверхностей с хорошими прочностными свойствами [4].

В данной статье авторы сделали попытку исследовать трибологические свойства мультимодальных покрытий, показанных на рисунке 1.

Как уже было отмечено, материалами для построения мультимодальных покрытий являлись самофлюсующийся сплав на основе никеля ПГ-12Н-01 и бронза ПГ-19М-01. Для сравнения также наплавлялись образцы с однородными покрытиями из сплава ПГ-12Н-01 и бронзы ПГ-19М-01. В качестве материала для образцов использовалась сталь 45. Нанесение покрытий производилось на лазерном технологическом комплексе на базе CO₂-лазера непрерывного действия «Комета 2» и координатной системы с числовым программным управлением «РУХ-4.0». Мощность излучения составляла 1000 Вт. Подачу порошка – 12 г/мин обеспечивал дисковый питатель.

Для испытаний в условиях сухого трения применялись призматические образцы размером 20×30×8 мм. Поверхность покрытий после наплавки на образцы шлифовалась до Ra 1,6 мкм. Испытания на износ выполнялись на установке МИПТ при возвратно-поступательном движении контртела относительно поверхности образца. Контртелом при испытаниях на износостойкость являлся алмазный наконечник типа Роквелл. При исследовании износостойкости в условиях сухого трения использовались следующие режимы: нормальная нагрузка – 2 Н; скорость движения каретки – 5 мм/с; длина единичного прохода – 15 мм; путь трения – 10 м.

Удельный объемный износ $V_{уд} \left(\frac{мм^3}{м} \cdot Н \right)$ рассчитывался по формуле 1.

$$V_{уд} = \frac{V}{S} \cdot P = \frac{b \cdot h \cdot L}{2S} \cdot P, \quad (1)$$

где V – объем изношенного материала;

S – путь трения ($S=10$ м);

P – нагрузка на контртело ($P=2$ Н);

b – ширина дорожки износа;

h – глубина дорожки износа;

L – длина единичного прохода ($L=15$ мм).

Глубина – h и ширина – b дорожки износа измерялись при помощи профилографа-профилометра Mar Surf PS1 – Explorer. Результаты определения удельного износа в условиях сухого трения были обработаны способом линейного приближения по методу наименьших квадратов с помощью редактора электронных таблиц Microsoft Excel 2010. Были получены зависимости удельного объемного износа 2D и 3D мультимодальных покрытий от скорости наплавки (рисунки 2а и 2б) и такие

же зависимости для однородных покрытий из самофлюсующегося сплава на основе никеля ПГ-12Н-01 и бронзы ПГ-19М-01 (рисунки 3а и 3б).

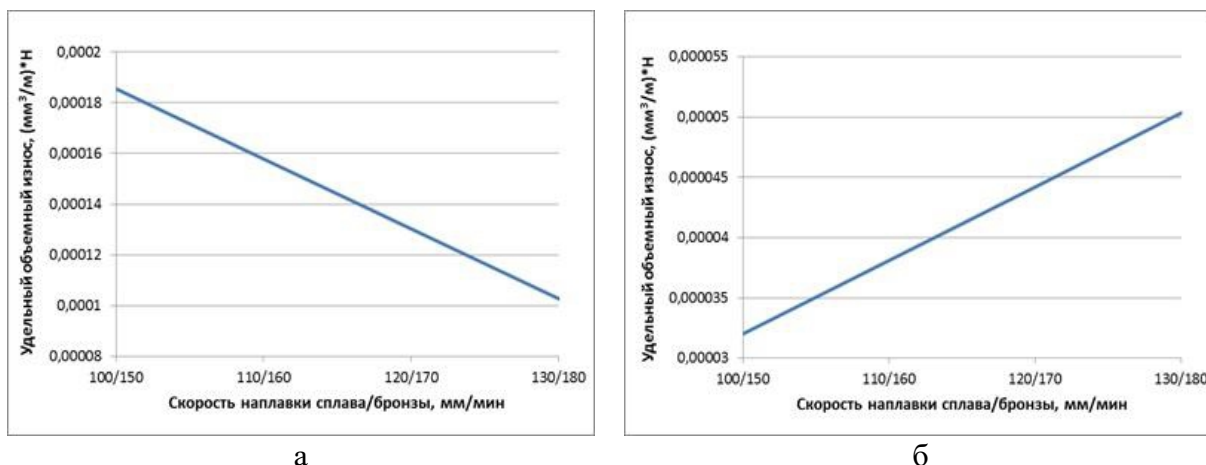


Рис. 2. Зависимости удельного объемного износа от скорости наплавки для 2D мультимодального покрытия (а) и для 3D мультимодального покрытия (б) в условиях сухого трения

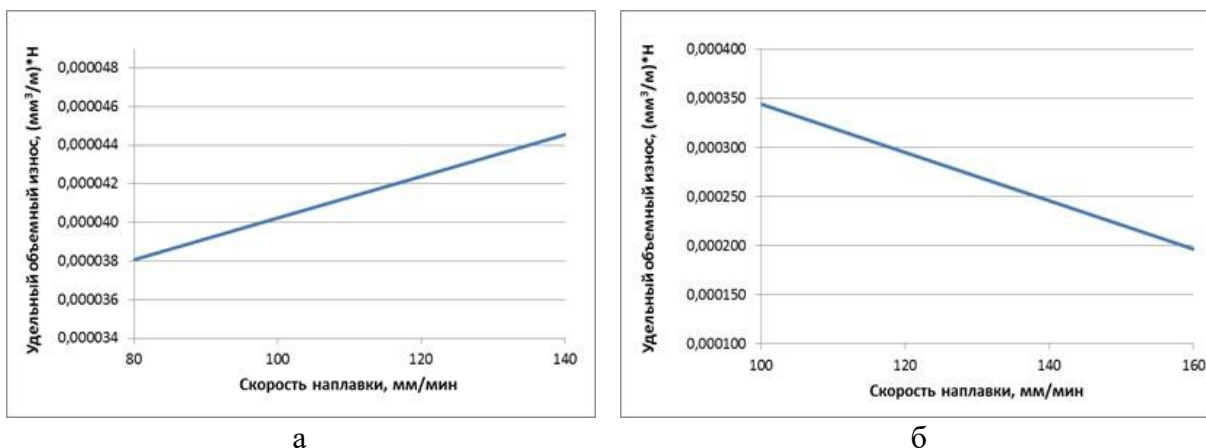


Рис. 3. Зависимости удельного объемного износа от скорости наплавки для однородных покрытий из сплава ПГ-12Н-01 (а) и бронзы ПГ-19М-01 (б) в условиях сухого трения

Анализируя полученные зависимости можно заметить, что для 3D мультимодального покрытия (рисунок 2б) и для покрытия из самофлюсующегося сплава на основе никеля (рисунок 3а) при сухом трении с увеличением скорости наплавки наблюдается рост удельного объемного износа. Диапазоны изменения величины износа при этом в большом интервале совпадают. Отличие состоит только в том, что для 3D мультимодального покрытия рост составляет 57,4 %, а для покрытия из самофлюсующегося сплава на основе никеля – 17 %. Можно предположить, что одинаковый вид зависимостей в данном случае определяется, прежде всего, самофлюсующимся сплавом ПГ-12Н-01, входящим, в том числе, в состав 3D мультимодального покрытия. Увеличение величины износа при росте скорости наплавки связано с возрастанием неполного сплавления материалов валиков по границам зерен из-за уменьшения удельной энергии, получаемой покрытием.

Также заметно подобие зависимостей удельного объемного износа от скорости наплавки для 2D мультимодального покрытия (рисунок 2а) и покрытия из бронзы ПГ-19Н-01 (рисунок 3б) при сухом трении. В обоих случаях при росте скорости наплавки

величина износа уменьшается, для 2D мультимодального покрытия на 44,5 %, а для покрытия из бронзы – на 42,8 %. Для обоих покрытий такой характер зависимостей объясняется наличием в их составе бронзы и изменением ее фазового состава и физико-механических свойств. Меньшая величина износа для 2D мультимодального покрытия связана с наличием в его составе моды высоко износостойкого самофлюсующегося сплава на основе никеля, что в сочетании с наличием фазы бронзы, играющей роль твердой смазки, увеличивает износостойкость.

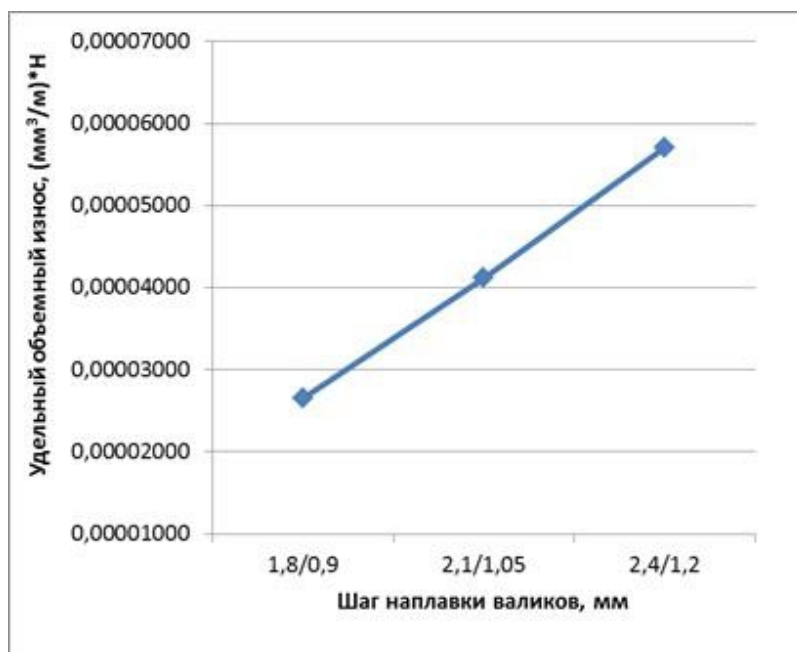


Рис. 4. Зависимость удельного объемного износа от шага наплавки валиков для 3D мультимодального покрытия при сухом трении

Было также проведено исследование влияния шага наплавки валиков на величину удельного объемного износа в условиях сухого трения (рисунок 4). При росте шага наплавки валиков в 3D мультимодальном покрытии с 1,8/0,9 мм до 2,4/1,2 мм удельный объемный износ этого покрытия увеличивается в 2,15 раза. В данном случае такая картина износа связана с тем, что с увеличением шага наплавки валиков уменьшается площадь фазы самофлюсующегося сплава на основе никеля, приходящаяся на единицу площади пятна контакта.

Для сравнения износостойкости покрытий при сухом трении на рисунке 5 приведена диаграмма, показывающая относительную износостойкость всех подвергнутых испытаниям покрытий. Наибольшей износостойкостью при сухом трении обладает 3D мультимодальное покрытие (6,57) и однородное покрытие из самофлюсующегося сплава на основе никеля ПГ-12Н-01 (6,55). Наиболее низкой износостойкостью обладает однородное покрытие из бронзы ПГ-19М-01 (1). Износостойкость 2D мультимодального покрытия (1,88), хотя и выше износостойкости покрытия из бронзы, тем не менее, она в 3,5 раза ниже износостойкости 3D мультимодального покрытия.

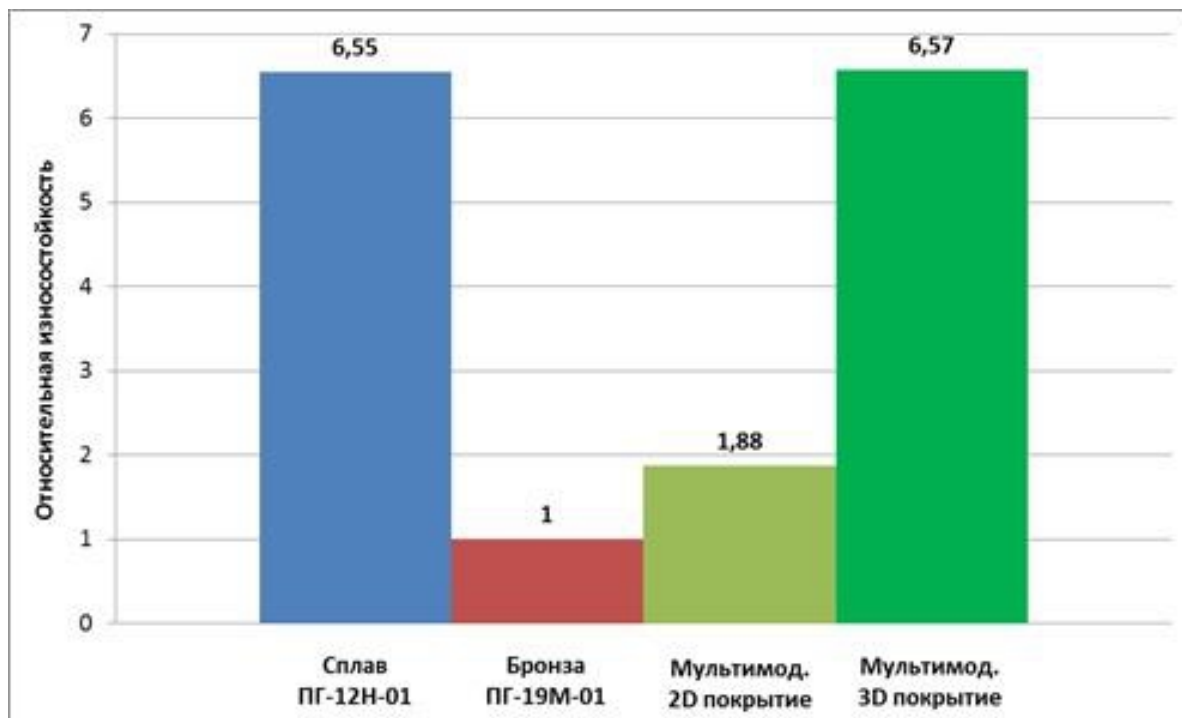


Рис. 5. Относительная износостойкость покрытий при сухом трении

Таким образом, видно, что при небольшой себестоимости нанесения 3D мультимодального покрытия, его износостойкость при сухом трении равна износостойкости однородного покрытия из высоко-износостойкого, но очень дорогого сплава на основе никеля [5]. Такие высокие эксплуатационные свойства мультимодального покрытия при сухом трении связаны с наличием в его составе двух компонентов, из которых сплав ПГ-12Н-01 выполняет роль силового корсета, а бронза ПГ-19М-01 участвует в процессах избирательного переноса, имеющих место при изнашивании мультимодального покрытия, как многокомпонентного, включающего мягкую составляющую [6].

Выводы:

- Проведенные исследования износа показали несомненные преимущества нанесенных лазерной наплавкой мультимодальных покрытий перед однородными покрытиями из тех же материалов, нанесенными тем же методом.

- Наиболее высокой износостойкостью в условиях сухого трения обладает 3D мультимодальное покрытие. Это покрытие, обладающее низкой себестоимостью нанесения, имеет износостойкость на уровне износостойкости покрытия из дорогостоящего самофлюсующегося сплава на основе никеля. Поэтому 3D мультимодальные покрытия могут с успехом заменять покрытия из самофлюсующегося сплава на основе никеля и обеспечивать значительное удешевление деталей с износостойкими покрытиями при увеличении их эксплуатационных показателей.

- Показатели износостойкости 2D мультимодального покрытия гораздо скромнее. Это покрытие, хотя и превосходит по износостойкости покрытие из бронзы, но его износостойкость значительно ниже не только износостойкости 3D мультимодального покрытия, но и износостойкости однородного покрытия из самофлюсующегося сплава на основе никеля.

- Полученные данные дают возможность обеспечивать заданную износостойкость мультимодальных покрытий и разрабатывать технологические процессы их нанесения на конкретные детали без необходимости отработки режимов в каждом отдельном случае.

Список литературы: **1.** Ratajski, J. Mechanical properties of antiwear Cr/CrN multimodule coatings/ J. Ratajski , A. Gilewicz, P. Bartosik, L. Szparaga// Archives of Materials Science and Engineering. – 2015. – V. 75. - I. 2. – P. 35-45. **2.** Gilewicz, A. The properties of multi-module and gradient coatings base on CrN/CrCN deposited on nitride 4140 steel/ A.Gilewicz, R. Olik, L. Szpraga, J. Ratajski// Problemy Eksploatacji – Maintenance Problems. – 2014. – I. 3. – P. 27-43. **3.** Vilar, R. Laser cladding/ R. Vilar// Journal of laser applications. – 1999. – V. 11. – I. 2. - P. 64-79. **4.** Шишковский И.В. Лазерный синтез функционально-градиентных мезоструктур и объемных изделий. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009, - С. 424 **5.** Борисов, Ю.С. Получение и структура газотермических покрытий на основе Ni-Cr-B-Si – сплавов/ Ю.С. Борисов, И.Н. Горбатов, В.Р. Калиновский и др.// Порошковая металлургия – 1985 - № 9 - С. 22-26. **6.** Берсенев, В.М. Влияние многокомпонентных и многослойных покрытий на процессы трения и износа// Физическая инженерия поверхностей. – 2004 - Т. 2. - № 4 - С. 214-219.

УДК 621

УТОЧНЕНИЕ ОЦЕНОК ВОЗДЕЙСТВИЯ СОВРЕМЕННЫХ ЖИДКОТОПЛИВНЫХ РАКЕТ-НОСИТЕЛЕЙ НА СТРАТОСФЕРНЫЙ ОЗОН

Ладоша Е.Н., Холодова С.Н., Цымбалов Д.С., Яценко О.В.

(ДГТУ, г. Ростов-на-Дону, Россия)

Тел: +7 (951) 8475165; E-mail: oleg_v_yatcenko@mail.ru

Abstract: Improved scientific estimation for rocket-produced ozone hole characteristics is performed. New approach is purposed at modern rocket carriers. Computer experiments enable to evaluate all important ozone hole parameters quite rigorously.

Гидроксил-радикал и оксид азота – малые составляющие в продуктах сгорания жидких ракетных топлив – являются важным антропогенным фактором в разрушении стратосферного озона. Предшествующие теоретические оценки размера и времени существования озоновых дыр [1-2] выполнялись применительно к ракетам-носителям (РН), составлявшим основную часть космического парка в прошлые десятилетия. Однако передел мирового рынка космических запусков и существенное изменение парка основных РН требуют определенной коррекции этих оценок. Поэтому целью данного исследования является сравнительный анализ озоновой экологичности современных средств космического извоза.

Динамика запусков тяжелых орбитальных и различных трансорбитальных космических аппаратов (КА) за последние два десятилетия показана на рис. 1.

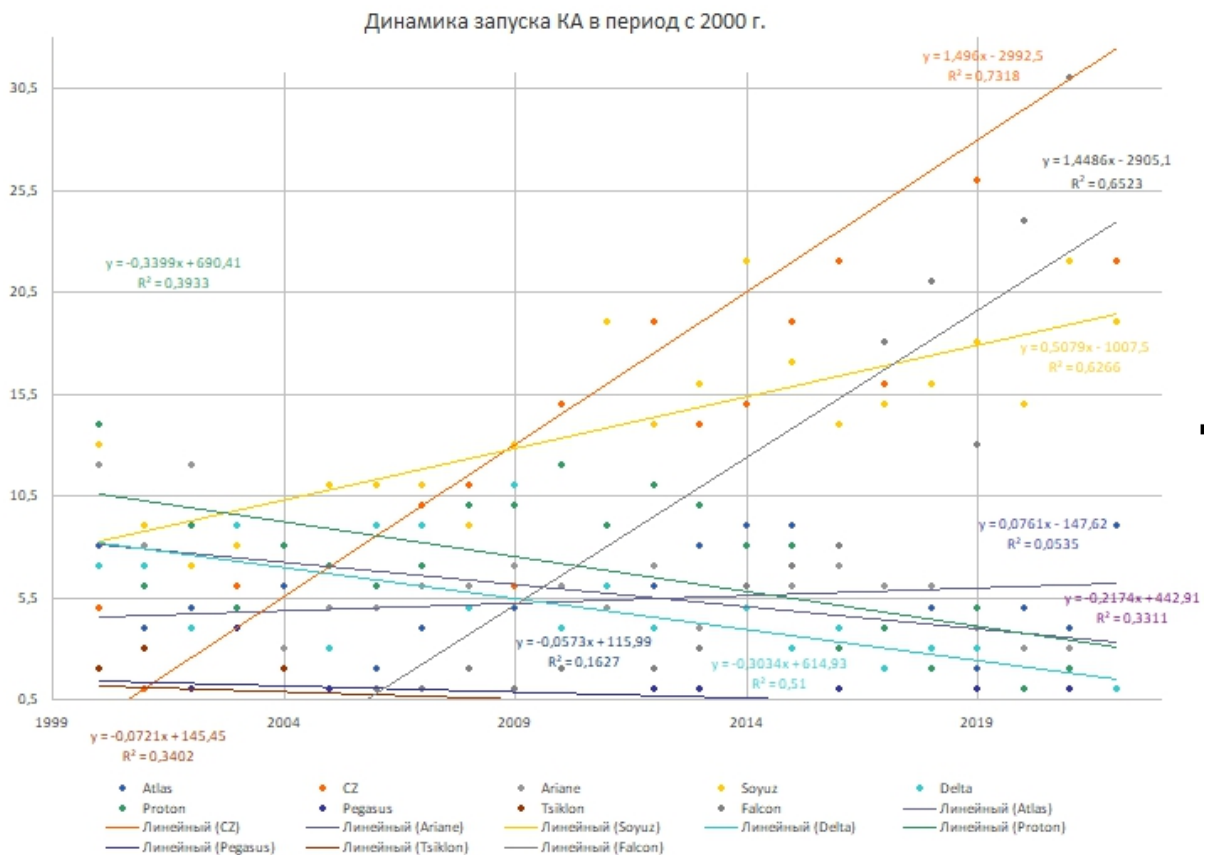


Рис. 1. Динамика запуска различных РН в два последние десятилетия

Предполагая тренды использования различных типов РН для запуска КА линейными, можно определить (рис. 1), что опережающими темпами растет использование РН типа CZ и Falcon (+1.5 запуска в год каждый), которые вытесняют с рынка «космического извоза» отечественный Союз (годовой прирост составляет +1/2 запуска) и прочие изделия (их совокупное использование сокращается на одну единицу в год).

В контексте нашей цели важными показателями РН являются их массовые, энергетические, расходные, а также собственно химические – т.е. используемое топливо, окислитель и их количественное соотношение. Соответствующие данные, полученные из открытых источников, приведены в табл. 1. Недоступные значения здесь восполнены оценками и помечены звездочкой.

Таблица 1

Технические характеристики современных РН, важные для оценки озоновой экологичности

РН Параметр	<i>Atlas V</i>	<i>C Z</i>	<i>Союз VI</i>	<i>Циклон III</i>	<i>Falcon IX</i>	<i>Протон M</i>
<i>M</i> , т	390	850	307	260	550	700
<i>M</i> ₁ , т	183	590	159	140*	409	430
Топливо	керосин	керосин	керосин	керосин	керосин	гепти
Окислитель	O ₂	O ₂	O ₂	O ₂	O ₂	амил
τ ₁ , с	184	173	140	170*	162	121
Окислитель / Топливо	73/27	2.5*	2.47	2.5*	2.5*	2.6
Расход, кг/с	1000	3400	1140	820	2520	3560
<i>P</i> , атм	250	60 - 250*	60	60 - 250*	97	169

Как видно из представленных в табл. 1 данных, большинство современных РН используют в качестве топлива керосин с условной формулой C₇H₁₃ и жидкий кислород. При этом соотношение окислитель – топливо близко к 2.5, давление в камере сгорания ограничивается диапазоном 60 – 250 атм., а секундный расход компонентов топлива (и соответственно продуктов сгорания) заключен в пределах 800 – 3500 кг/с. Исключение составляет устаревшая РН «Протон», озон-токсические характеристики которой ранее оценивались в работах [2-3]. Особенностью последней является загрязнение озоносферы сразу двумя параллельно действующими разрушителями O₃ – радикалами OH и NO.

Согласно [2,3] расчет погонной плотности [ОН](*H*) в реактивном следе РН (*H* – высота) базируется на модели разгонной динамики и методике расчета равновесного состава продуктов сгорания [3]. Последняя может состоять как в решении системы уравнений материального баланса, содержащей константы равновесия для химических реакций между учитываемыми веществами, так и в минимизации термохимического потенциала [3] методами математического программирования [4].

Ключевым моментом в расчетах химических равновесий обоими возможными способами является выбор адекватного «химического базиса» – набора учитываемых в модели веществ [5]. Анализ термохимических показателей участвующих в горении ракетных топлив веществ позволяет остановиться на следующем составе продуктов реакции: CO – O – CO₂ – O₂ – **ОН** – Н – Н₂O – Н₂ – С₂H₂, среди которых разрушитель озона, выделенный жирным шрифтом.

Соответственно первичное термохимическое возмущение озоносферы реактивным выбросом РН описывается уравнениями:

$$v(H) \approx 0.025 \cdot (H + 10000), \quad (1)$$

$$r_{\text{ini}}(H, \dot{m}_1) \approx 0.1 \sqrt{2.7 - 2.8 \cdot 10^{-5} H} e^{H/16000} \sqrt{\dot{m}_1}, \quad (2)$$

$$\Delta c/c(H) \approx \Delta \rho/\rho(H) \approx 45.8 \cdot 10^6 / [(9.8 \cdot 10^4 - H)(H + 10000)] - \text{уплотнение}, \quad (3)$$

$$\Delta c_{i,H}/c(H) \approx 1.15 \cdot 10^9 / [\mu_i (9.8 \cdot 10^4 - H)(H + 10000)] - \text{химическое возмущение}, \quad (4)$$

$$\Delta T_H/T_H(H) \approx (9.8 \cdot 10^4 - H)/(H + 10000) - \text{степень нагрева}, \quad (5)$$

$$G(P, T) = \sum_j e^{c_j} [g_j(T) + RT \ln(\frac{e^{c_j}}{\sum_j e^{c_j}} \cdot P)] \rightarrow \min, \quad (6)$$

$$g_j(T) = H_j(T_0) + C_{p,j}(T - T_0) - C_{p,j} T \ln \frac{T}{T_0} - S_j(T - T_0), \quad (7)$$

$$n_j = e^{c_j}, \quad \sum_j n_j = \sum_j e^{c_j} = n,$$

$$j = \{CO, O, CO_2, O_2, OH, H, H_2O, H_2, C_2H_2\}, \quad (8)$$

$$\alpha n = \beta. \quad (9)$$

В этих формулах r_{ini} – начальный радиус следа; H – высота; \dot{m}_1 – секундный расход горючего; $g_j(T)$ – термодинамический потенциал j -го вещества, $H_j(T_0)$ – энтальпия его образования в стандартных условиях (298 К); $C_{p,j}$ и S_j – молярные теплоемкость и энтропия; n_j – молярная концентрация; c_j – исключая отрицательность концентрации переменная; α – матрица содержания составляющих вещества элементов (углерода С, и водорода Н) в компонентах смеси; β – вектор количества химических элементов, из которых состоят рассматриваемые вещества. В расчетах использовались числовые параметры модели (1)-(9) согласно [3].

Для проверки адекватности общего подхода, модели, точности исходных данных (коэффициентов и параметров) результаты расчетов сопоставлялись с доступными надежными данными [6]. Кроме того, учитывая, что решение подзадачи (6)-(9) должно непрерывным образом зависеть от всех фигурирующих в ней параметров, результаты вычислений проверялись на устойчивость к слабым коэффициентным и параметрическим возмущениям.

Данные работы [6] представляют собой расчетный состав продуктов сгорания и температуры при сжигании аммиака в кислороде в зависимости от соотношения n_O/n_H . Выявлено отличное согласие результатов по всем главным компонентам, если использовать одинаковый химический базис (с этой целью модель (6)-(9) дополнялась компонентами N_2 и NO). Сопоставление нашего и эталонного расчетов приведено на рис. 2. Определенное расхождение вызвано, главным образом, погрешностью оцифровки эталонных кривых. Если же использовать более подробную модель, которая включает разные окислы азота и водорода, концентрация малых составляющих оказывается ожидаемо ниже чем в модели [6]. Это объясняется тем, что ограниченное число атомов всех трех сортов теперь перераспределяется на большее число реагентов.

Также разработка тестировалась на устойчивость к возмущениям коэффициентов ($\Delta H_i, C_{p,i}, S_i$) и условий расчета. Оказалось, что случайные вариации коэффициентов $\Delta H_i, C_{p,i}, S_i$ на уровне $\pm 1\%$ приводят к изменениям результатов $n_i(n_O/n_H, P, T)$ на $\pm 3\%$, изменение давления на 1% сопровождается изменением $n_i(n_O/n_H, P, T)$ на доли процента, а 1% -е изменение температуры – изменением расчетных концентраций не более чем на несколько процентов. Таким образом, модель и реализующие алгоритмы устойчивы к естественным параметрическим возмущениям.

Вкупе соответствие модельных расчетов надежным тестовым данными и комплексная устойчивость результатов расчетов позволяют использовать разработку для

расчетов продуктов сгорания актуальных в настоящее время керосин – кислородных пар.

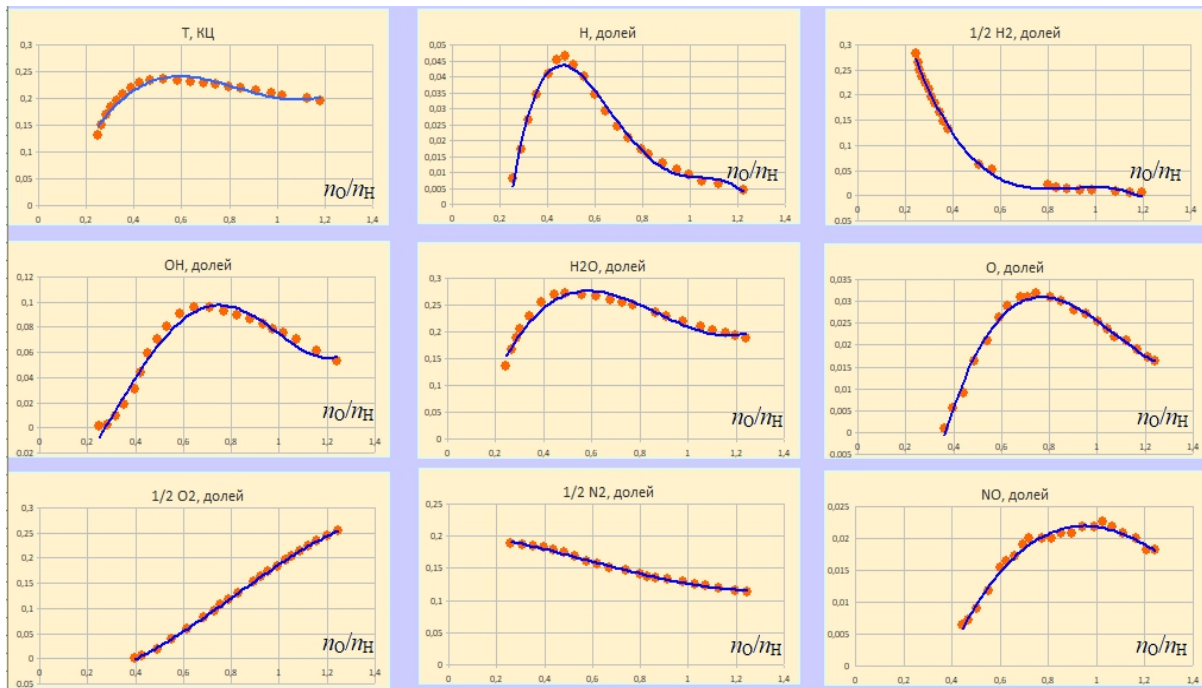


Рис. 2. Сопоставление результатов расчетов $n_i(n_o/n_H)$ и $T(n_o/n_H)$ согласно субмодели (6)-(9) с данными [6] при одинаковом наборе компонентов

Оценка максимального содержания радикала OH в реактивной струе производилась путем последовательных расчетов на сетке давления 50 – 100 – 150 – 200 – 250 атм и температуры 2500 – 2600 – 2700 – 2800 – 2900 – 3000 град. Ц. При этом соотношение окислитель/топливо принималось равным 2.5. Соответствующий результат показан в табл. 2 и на рис. 3. Видно, что [OH] существенно зависит от температуры и в меньшей степени от давления. Это обусловлено резкой интенсификацией диссоциации конечного продукта H₂O с ростом температуры и, наоборот, замедлении при увеличении давления в камере сгорания. Содержание этого компонента в реактивном выхлопе РН особо велико при использовании двигателей с высокой температурой и малым давлением в камере сгорания.

Таблица 2

Относительная концентрация гидроксила OH в реактивном ракетном следе

Давление, атм	Температура, К					
	2500	2600	2700	2800	2900	3000
50	0,00322	0,007003	0,010827	0,016186	0,020854	0,029774
100	0,002107	0,00501	0,007887	0,011604	0,016138	0,020078
150	0,001917	0,003973	0,00661	0,009229	0,01287	0,016205
200	0,001512	0,003504	0,0059	0,00807	0,0119	0,014588
250	0,001342	0,003269	0,004763	0,007894	0,009558	0,013529

С погрешностью в несколько процентов данные расчета рис. 3 описываются формулой:

$$[\text{ОН}] \approx 0.000001 \cdot (T - 2350)^{1.5} / (P/100)^{-0.5}. \quad (10)$$

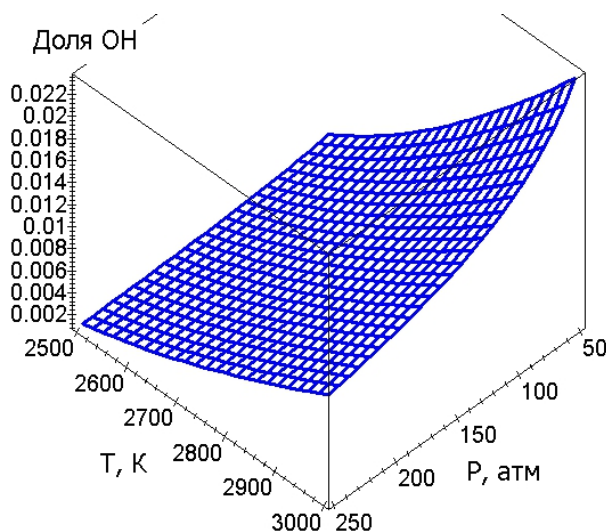


Рис. 3. Зависимость содержания гидроксила в следе керосин – кислородных РН (приведена в сглаженном методах математического программирования [4] варианте (10))

Обобщают результаты проведенных авторами компьютерных экспериментов следующие выводы: 1) реализована модель образования токсичного для озоносферы компонента ОН, принципиально позволяющая рассчитывать состав продуктов сгорания современных и перспективных жидкотопливных ракет; 2) выброс ОН сильно зависит от температуры и слабо от давления; 3) с ростом температуры в камере сгорания выход ОН увеличивается; 4) максимальное содержание ОН в струе керосин-кислородного двигателя может достигать 2 %, что более на порядок превышает сделанные ранее оценки; 5) практический интерес также представляет возможность рассчитывать состав реактивного выхлопа для прочих используемых топливных пар.

Список литературы: 1. Фадин И.М., Полетаев Б.И., Сидоров В.Н. Экология комоса. С.-Пб.: Изд-во БГТУ «ВОЕНМЕХ», 2005. 280 с. 2. Яценко О.В., Ладоша Е.Н. Космическая экология: антропогенные воздействия на стратосферный озон при запусках жидкотопливных ракет-носителей (теоретические оценки, компьютерная имитация) // Инженерная экология. 2005. № 6. С. 27-45. 3. Бакулин В.Н., Ладоша Е.Н., Месхи Б.Ч. и др. Научные основы защиты озонового слоя стратосферы в условиях освоения космического пространства при помощи ракет на химическом топливе. – Ростов н/Д.: Изд-во ДГТУ, 2009. – 188 с. 4. Тарасов В.Н., Бахарева Н.Ф. Математическое программирование. Теория, алгоритмы, программы. – Самара: РИЦ «Гольфстрим», 2007. – 222 с. 5. Степанов Н.Ф., Ерлыкина М.Е., Филиппов Г.Г. Методы линейной алгебры в физической химии. – М.: Изд-во МГУ, 1976. – 360 с. 6. Щетинков Е.С. Физика горения газов. – М.: Наука, 1965. – 740 с.

УДК 621

**ПОВЫШЕНИЕ РЕСУРСА ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС НА ОСНОВЕ НАНЕСЕНИЯ
МНОГОСЛОЙНЫХ ПОКРЫТИЙ НА РАБОЧИЕ ПОВЕРХНОСТИ ЗУБЬЕВ**

Лахин А.М., Скляр В.А., Воронов М.А.
(каф. ТМ, ГОУ ВПО «ДонНТУ», г. Донецк, ДНР)
Тел./факс: +38(062)3010805; E-mail: lelax@mail.ru

***Аннотация.** В работе предложен способ повышения ресурса тяжело нагруженных зубчатых колес за счет нанесения многослойных покрытий на рабочий профиль зубьев.
Ключевые слова. Зубчатое колесо, технология, покрытие, качество.*

В настоящее время во всех сферах промышленности широко применяются зубчатые передачи, преимущества которых очевидны по сравнению с остальными видами силовых передач. Отметим основные из них: высокая нагрузочная способность при малых габаритах передачи, постоянство передаточных отношений, наличие большого разнообразия конструктивных исполнений позволяющих передавать моменты между параллельными, скрещивающимися и пересекающимися осями, возможности использовать как элементы жидкостных насосов гидроприводов и другие.

Вместе с тем эффективная эксплуатация зубчатых передач возможна только при обеспечении требуемых параметров качества зубчатых колес, обеспечиваемых при изготовлении. Среди параметров качества обеспечивающих надежную эксплуатацию зубчатых колес основными являются точность комплекса параметров зубьев и физико-механические свойства поверхностных слоев рабочей части зубьев. Причем практика показывает что характер износа рабочей части зуба не равномерный и имеет некоторые закономерности.

Целью данной работы является определение закономерностей износа рабочих поверхностей зубьев для создания эффективных способов отделочной и упрочняющей обработки и компенсации неравномерности износа зубьев.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи: исследовать условия работы зубьев при зацеплении для установления закономерности изнашивания зубьев, определить ожидаемый характер износа рабочих поверхностей зубьев, предложить способы отделочной и упрочняющей обработки зубчатых колес в соответствии с ожидаемым характером износа рабочей поверхности зубьев.

Для эвольвентных зубчатых колес характер проявления износа обусловлен взаимным скольжением профилей зубьев при постоянном изменении составляющих скоростей зубьев шестерни и колеса. В процессе зацепления контакт пары зубьев начинается в зоне головки шестерни и ножки колеса (рис.1). По условиям зацепления нормальная составляющая скорости в точке контакта двух сопряженных зубьев равны на обоих зубьях. В тоже время касательная составляющая в месте контакта пары зубьев различна для зуба шестерни и колеса, что вызывает взаимное скольжение профилей пары зубьев. Это вызывает износ на поверхностях сопряженных зубьев. Причем характер износа по высоте зуба, при постоянных свойствах материала зубчатых колес неравномерен и в целом соответствует графику скорости взаимного скольжения

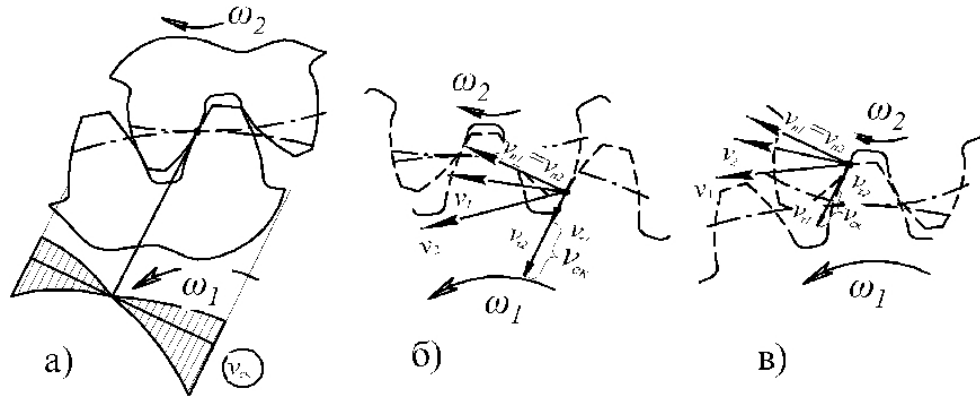


Рис. 1. Изменение скорости в зоне зацепления пары зубьев

Прошлыми исследованиями [1] установлено, что переменный характер износа вследствие трения профилей сопряженных зубьев наиболее ярко проявляется для тяжело нагруженных передач работающих при скоростях до 20 м/с, а также открытых передач, работающих в условиях сухого трения. При этом износ зуба в любой точке профиля определяется следующей зависимостью:

$$h_{1,2} = 2,25 I_{h1,2} \sqrt{P_n \left(\frac{1-\mu_1^2}{E_1} + \frac{1-\mu_2^2}{E_2} \right) \frac{\rho_1 \rho_2}{\rho_1 + \rho_2} \frac{v_{ск}}{v_{1,2}} n_{1,2} z_{n1,2} t_{1,2}}$$

где I_h – интенсивность износа, характеризующая величину износа на длину пути трения;

P_n – нагрузка на единицу длины контактной линии;

ρ_1, ρ_2 – радиусы кривизны профиля в точке контакта соответственно шестерни и колеса, м;

$v_{ск}$ – скорость скольжения в контакте, м/с;

$n_{1,2}$ – количество оборотов, соответственно, шестерни и колеса;

$z_{n1,2}$ – количество пар зацепления, соответственно, шестерни и колеса;

$t_{1,2}$ – ресурс работы, соответственно, шестерни и колеса, мин;

$v_{1,2}$ – касательные составляющие скоростей точек сопряженных профилей зубьев, соответственно, шестерни и колеса, м/с.

Интенсивность изнашивания зубьев тяжелонагруженных передач определяется выражением [1]:

$$I_h = k \left(\frac{\sigma_H}{HB} \right)^{m_1} \left(\frac{\chi}{h_{см}} \right)^{m_2} \left(\frac{RT}{Q} \right)^{m_3} \left(\frac{v_{100}}{v_1} \right)^{m_4}$$

где k, m_1, m_2, m_3 – коэффициент, и показатели степени, учитывающие физико-механические свойства контакта;

χ – приведенный параметр шероховатости сопрягаемых поверхностей;

$h_{см}$ – толщина смазочного слоя, образованного слоем граничной смазки и смазочным слоем контактно-гидродинамической природы;

v_{100}, v_1 – соответственно, кинематическая вязкость масла при 100⁰С и при рабочей температуре смазочного материала.

Из данной формулы видно, что интенсивность изнашивания контактируемых поверхностей обратно пропорциональна твердости, а следовательно, при прочих равных условиях, повышение твердости поверхностного слоя способствует снижению интенсивности изнашивания рабочих поверхностей зубьев. Поэтому среди технологических методов обработки зубчатых колес наибольший интерес представляют методы, обеспечивающие увеличение твердости поверхностного слоя, закономерно изменяющейся по высоте зуба. Также исходя из трения на участках рабочего профиля

зубьев, меньшему износу будет способствовать снижение коэффициента трения на участках с наибольшим взаимным скольжением рабочих профилей зубьев. Данное условие возможно только при нанесении слоистых покрытий на рабочие поверхности зубьев. Свойства данных покрытий необходимо подбирать таким образом чтобы также обеспечивалась повышенная твердость поверхностного слоя и прочная адгезионная связь покрытия как с основным материалом (подложкой), так и между слоями покрытия. Компенсация неравномерного износа может быть достигнута наличием дополнительных слоев покрытия более нагруженных участков (рис.2). Дополнительные слои покрытия, кроме обеспечения повышенных физико-механических свойств участков, выступают в роли компенсаторов износа для участков с повышенным трением, тем самым допуская износ только по слоям покрытия и не доходя до основного материала зубчатого колеса. Таким образом за весь ресурс работы зубчатой передачи сохраняется исходная форма и точность параметров зубчатого колеса. За счет этого, путем восстановления покрытий, может быть обеспечена повторная эксплуатация зубчатых с восстановленными покрытиями. При этом, за счет малой толщины покрытия (7-8 мкм) для средне и крупномодульных зубчатых колес его наличие не оказывает существенного влияния на точность параметров зубьев и при 3-5 слоях покрытия должна находиться в пределах поля допуска на размеры зубьев. В особых случаях допускается уменьшение на 1-2 класса типа сопряжения для увеличения бокового зазора в зацеплении, который вернется к исходному после нанесения покрытий.

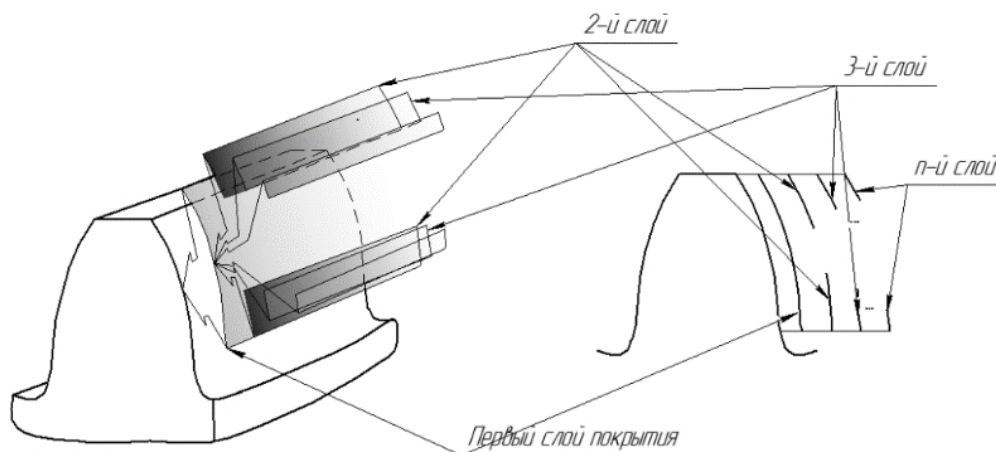


Рис. 2. Нанесение многослойного покрытия на рабочие поверхности зубьев

Нанесение слоистых покрытий может быть реализовано поэтапным процессом нанесения с использованием защитных масок между этапами нанесения с целью предохранения участков не требуемых повышенных физико-механических свойств поверхностного слоя. Такими участками являются центральная часть рабочей поверхности зуба у полюсной линии.

Технологический процесс дополнительной отделочно-упрочняющей обработки зубьев для предварительно изготовленного зубчатого колеса с требуемой точностью размеров и свойствами материала, может быть представлен следующими этапами:

- 1 . механическое полирование рабочих поверхностей зубьев до шероховатости $Ra=0,08..0,16$ мкм;
2. ультразвуковая очистка рабочих поверхностей, обезжиривание перед помещением в камеру для нанесения покрытий;
3. нанесение первого слоя покрытия на поверхности зубьев;

4. высотнo-сглаживающее полирование рабочих поверхностей с целью удаления дефектных участков покрытия и достижения заданной шероховатости;
5. мойка и обезжиривание;
- 6 нанесение защитных масок на участки у полюсной линии зубьев
7. нанесение второго слоя покрытия;
8. – повторение этапов 4-7 несколько раз в соответствии с выбранным количеством слоев покрытия.
9. Окончательное высотнo-сглаживающее полирование, очистка и мойка зубчатых колес.

Таким образом, в данной работе был предложен способ нанесения многослойных покрытий переменной толщины на рабочие поверхности зубьев, позволяющий обеспечивать переменные свойства вдоль рабочего профиля зуба, для достижения равномерного износа зубьев в течении срока эксплуатации зубчатых колес. Применение данного способа позволяет повысить ресурс зубчатых колес, обеспечить постоянство геометрических параметров рабочего профиля зубьев и дает возможность восстановления зубчатых колес путем повторного нанесения покрытий после их изнашивания.

Список литературы: 1. Когаев В.П. Прочность и износостойкость деталей машин. Учебное пособие для машиностроительных специальностей вузов / В.П. Когаев, Ю.Н. Дроздов // – М.: Высш. школа, 1991. – 319 с. ISBN 5-06-001905-5. 2. Кудрявцев В.Н. Зубчатые передачи. - М.: «Машгис», 1957. – 263 с. 3. Лахин А.М. Особенности применения функционально-ориентированного подхода в производстве изделий с зубчатым венцом // Прогресивні технології і системи машинобудування: Міжнародний зб. наукових праць. – Донецьк: ДонНТУ, 2013. Вип. 45. С. 149 – 155.

УДК 62-882

**МОДЕЛЬ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ
СТАЦИОНАРНОГО КОНСОЛЬНО-ПОВОРОТНОГО КРАНА
НА ОСНОВЕ СРЕДСТВ ПАКЕТА MATLAB SIMSCAPE****Мамолат А.Г., Полтавец В.В.***(кафедра МСМО, ГОУВПО «ДОННТУ», г. Донецк, ДНР)*

Аннотация. В статье рассмотрена модель электромеханической системы стационарного консольно-поворотного крана типа ККМ6 / ККМ7, построенная средствами пакета Simscape среды MATLAB.

Ключевые слова: консольный кран, электромеханическая система, имитация, звено.

Введение

Среди всех разновидностей грузоподъемной техники, применяемой в промышленном производстве, консольные краны приобрели особую популярность благодаря своей высокой эффективности и универсальности. Консольный кран состоит из двух главных элементов: фермы (вертикальной колонны – несущей части конструкции) и собственно консоли. Консоль – это горизонтальная балка, по которой движется тележка с грузозахватным механизмом (например, крюком или магнитным захватом). Механизм можно опускать и поднимать, а сама тележка перемещается только в горизонтальной плоскости.

Благодаря своей конструкции, консольные краны наиболее эффективны при подъемно-транспортных работах в условиях ограниченной площади производственного участка. В промышленности используется два основных вида консольных кранов: стационарные консольные краны и передвижные консольные краны. Первый вид кранов широко применяется в производственных помещениях различной площади: цехах, участках, мастерских и др. для обслуживания стационарного технологического оборудования. Небольшие ручные стационарные краны хорошо подходят для условий ремонтных мастерских, авторемонтных предприятий и т.п. Второй вид – передвижные консольные краны – может использоваться на производстве вместо мостовых кранов. Консольные краны могут оснащаться как электрическими, так и ручными тельферами [1].

В механических и сборочных цехах наиболее широко применяются стационарные консольно-поворотные краны на колонне с опорами (фундаментом) или на свободно стоящей колонне. Такой кран имеет цилиндрическую колонну, на верхнюю часть которой опирается двутавровая балка (стрела) с установленным на ней тельфером. Поворот крана осуществляется ручным способом либо при помощи электродвигателя.

Стационарные консольно-поворотные краны не занимают большую производственную площадь, просты в эксплуатации и в нерабочем состоянии практически не мешают работе других технологических машин и механизмов. Они могут монтироваться в уже полностью функционирующем производственном подразделении без остановки производственного процесса. Консоль крана типа ККМ6 поворачивается на 270°; типа ККМ7 – поворачивается без ограничений на 360° [2].

Консольно-поворотный кран с поворотом стрелы при помощи электродвигателя представляет собой многодвигательную многотельферную электромеханическую систему. Компоненты такой системы подбираются индивидуально для каждой конструкции кра-

на, так как и стационарные, и передвижные краны изготавливают под конкретную задачу, собирают и монтируют на определенном промышленном объекте в определенном производственном помещении. Краны проектируют, учитывая тип и массу перемещаемых грузов, размеры и характеристики помещения, условия производства на данном предприятии. Для ускорения процесса проектирования необходимо использовать имитационную модель электромеханической системы консольно-поворотного крана.

Основное содержание работы

Общий вид стационарного консольно-поворотного крана типа ККМ7 грузоподъемностью 5 т производства Российской Федерации приведен на рис. 1.

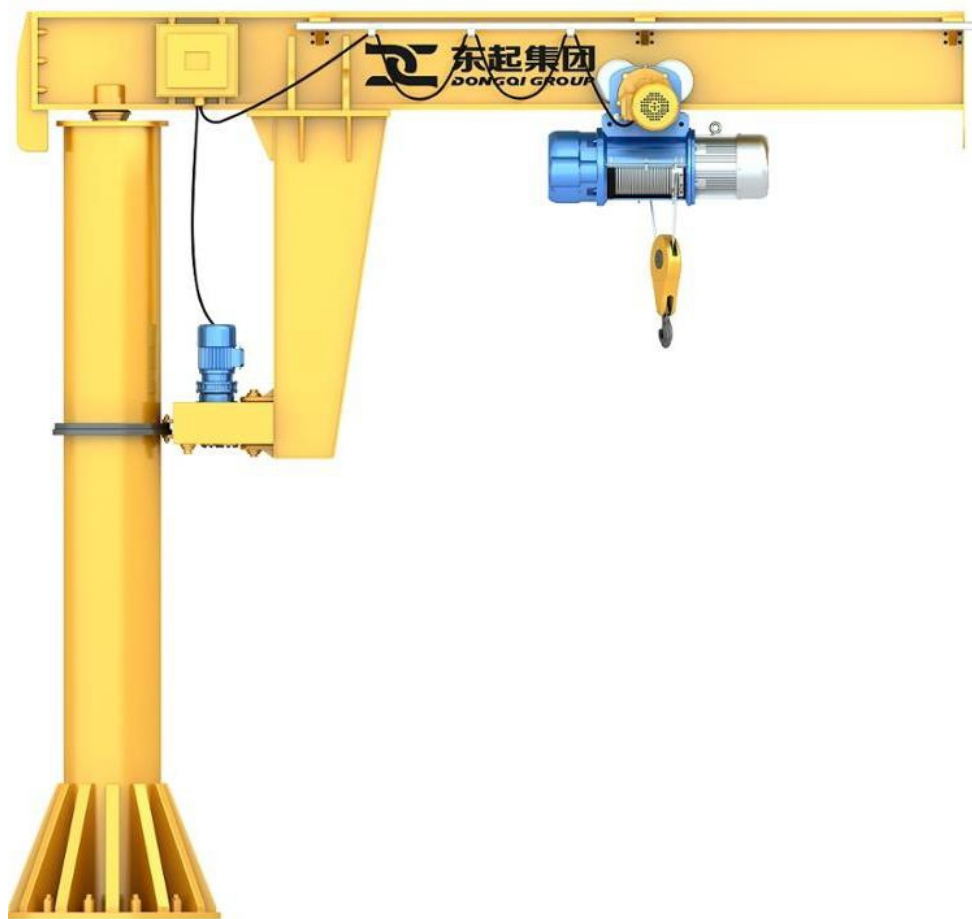


Рис. 1. Общий вид стационарного консольно-поворотного крана типа ККМ7

Динамическая система представленного на рис. 1 консольного крана включает четыре основных звена: колонна (её поворотная часть), стрела (консоль), тележка, перемещаемый груз. Для построения математической модели консольно-поворотного крана сформируем его расчетную кинематическую схему (рис. 2).

Динамическая система крана имеет пять степеней свободы: поворот колонны вокруг оси Y на угол φ ; поступательное движение тележки вдоль стрелы крана (перемещение по оси X) – r ; смещение груза по вертикали (вдоль оси Y) – l ; поворот груза вокруг оси Z на угол φ_z ; поворот груза вокруг оси X на угол φ_x .

Для создания моделей физических систем в среде MATLAB Simulink предназначен пакет Simscape. С его помощью моделируются компоненты системы с различной физической природой: электрические, механические, гидравлические, пневматические.

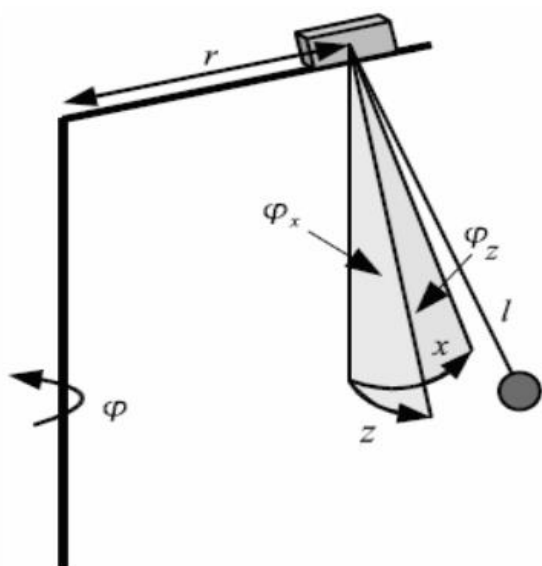


Рис. 2. Расчётная кинематическая схема консольно-поворотного крана

Simscape предлагает естественный и эффективный метод для составления математической модели физических систем. Создание междисциплинарных моделей физических систем в пакете Simscape не требует вывода уравнений, описывающих процессы в моделируемой системе [3].

Имитационную модель консольно-поворотного крана сформируем по аналогии с моделью строительного поворотного башенного крана РДК-25 [4].

При помощи блока вращательно-го шарнира Revolute к неподвижной части колонны крепится её поворотная часть. Вращение поворотной части колонны вокруг оси Y задается в блоке Revolute, а высота и центр тяжести – в блоке Body. На верхнем конце колонны при помощи соединения Weld крепится

стрела. По стреле должна перемещаться тележка, представленная блоком Body и соединенная со стрелой блоком Prismatic – блок поступательного шарнира, имеющий только одну степень свободы – линейное перемещение вдоль оси координат X.

Как уже отмечалось, перемещаемый груз имеет 4 степени свободы (см. рис. 2). Для его моделирования воспользуемся соединением, которое имеет возможность задавать перемещение с шестью степенями свободы, – Custom Joint. В диалоговом окне настройки параметров данного соединения выбираем вращение по трем осям: R1, R2, R3 – Revolute и линейное перемещение груза при его подъеме и опускании P1 – Prismatic. Каждый соединительный блок (Revolute, Prismatic или Custom Joint) имеет порты для активаторов Joint Aktuator и датчиков Joint Sensor, количество которых указывается в окне параметров соединительного блока. В качестве активаторов для вращения колонны крана, движения тележки по стреле, подъема и опускания груза используются асинхронные двигатели. Сенсорами выступают виртуальные датчики положения, скорости и ускорения (а в случае вращения – и угла поворота относительно осей координат). Их значения выводятся в окно результатов моделирования – Display.

Основу модели любого механизма в Simscape составляет цепь звеньев типа Ground-Joint-Body-Joint-Body-Joint-...-Body. Эти цепи могут быть с открытой или с закрытой топологией, то есть замкнутые или разомкнутые [5]. Для задания параметров звеньев (тел) необходимо знать их геометрические и массовые характеристики, т.е. координаты звеньев в глобальной системе координат и координаты центров масс в локальной системе координат. Указанные параметры берутся из чертежа крана или его отдельных узлов.

Разработанная модель консольно-поворотного крана отличается от модели, реализованной в работе [4] с использованием пакета SimMechanics, отсутствием противовесной консоли, так как изгибающий момент для колонны консольно-поворотного зна-

чительно менее опасен, чем для башни поворотной башенного крана (рис. 3). Двигатель 1 осуществляет вращение поворотной части колонны относительно неподвижной, двигатель 2 – перемещение тележки по стреле, двигатель 3 – подъем и опускание груза.

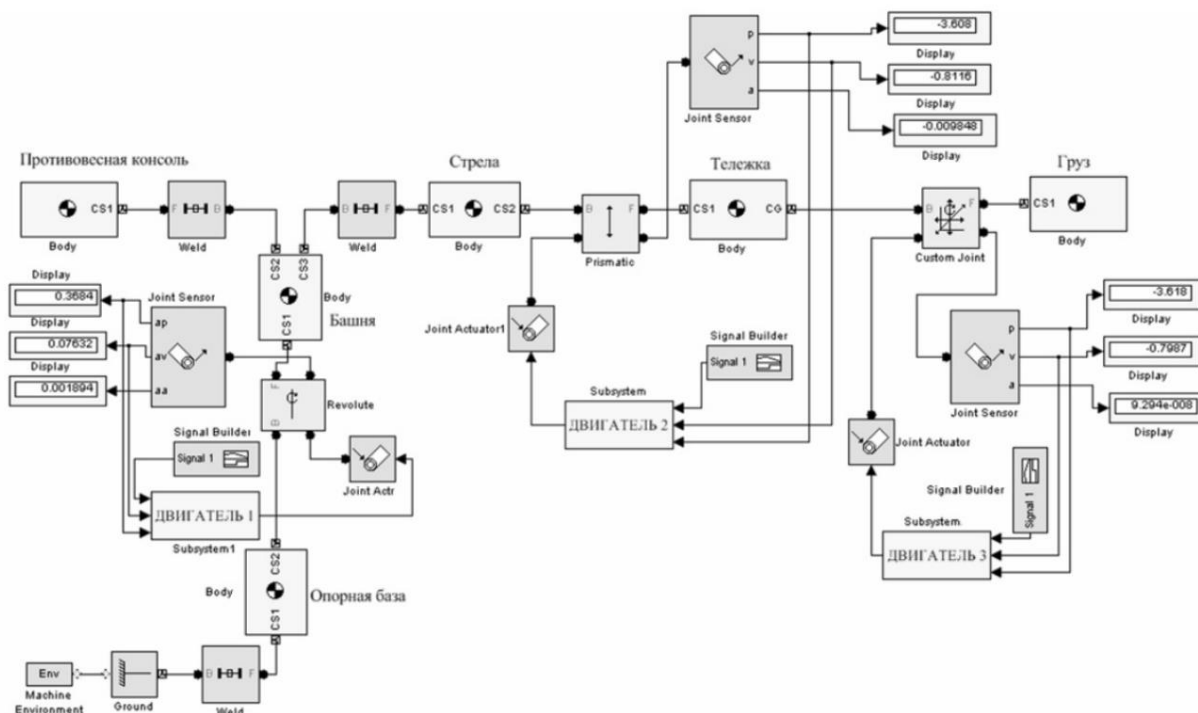


Рис. 3. Имитационная модель башенного поворотного крана [4]

Вывод

Полученная нами имитационная модель стационарного консольно-поворотного крана может быть использована для анализа динамических процессов в электромеханической системе крана как на этапе его проектирования, так и при изучении эксплуатационных характеристик установленных на производстве кранов.

Список литературы: 1. Обзор консольных кранов // Главная. Новости. – Текст: электронный. – URL: <http://24-kran.ru/index.php/news/681-obzor-konsolnykh-kranov/> (дата обращения: 07.10.2022). 2. Краны консольные поворотные стационарные // Каталог. Крановое оборудование. Краны консольные. – Текст: электронный. – URL: <https://spb.t-oborudovanie.ru/kranovoe-oborudovanie/krany-konsolnye/krany-konsolnye-povorotnye-stacionarnye/> (дата обращения: 07.10.2022). 3. Моделирование и симуляция междисциплинарных физических систем // Главная. Продукты и услуги. Simscape. – Текст: электронный. – URL: <https://exponenta.ru/simscape/> (дата обращения: 07.10.2022). 4. Макаревич, Е.В. Математическая модель поворотного крана с использованием SimMechanics / Е.В. Макаревич, В.Н. Шамардина, Ф. Палис, С. Палис // Вестник Нац. техн. ун-та «ХПИ»: сб. науч. трудов. Темат. вып.: Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2010. – № 28. – С. 102-103. 5. Ахпашев, А.Ю. Моделирование рычажных механизмов экскаваторов в среде MATLAB Simulink / А.Ю. Ахпашев // Молодежь и наука: сб. материалов IX Всероссийской науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых с междунар. участием, посвященной 385-летию со дня основания г. Красноярск. – [Электронный ресурс]. – Красноярск: Сибирский федеральный ун-т, 2013. – Режим доступа: <http://conf.sfu-kras.ru/sites/mn2013/section106.html>, свободный.

УДК 621.45.0.002.2(0.75.8)

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ КОМПЛЕКСНОГО
ОБЕСПЕЧЕНИЯ ФОС СТРУКТУРЫ ГТД**

Михайлов Д.А., Михайлов А.Н., Шейко Е.А., Куликович Н.Д., Антонюк Д.Н.

(кафедра МД, кафедра ТМ, АГЗ МЧС ДНР, ДонНТУ, ДНР, РФ)

Тел.: +7 949 3060879; E-mail: mntk21@mail.ru

Аннотация. В статье приведены технологические особенности комплексного обеспечения функционально-ориентированных свойств структуры авиационного газотурбинного двигателя. Представлена схема реализации принципа функциональной ориентации эксплуатационных функций, свойств и технологических воздействий. А также разработана схема композиции многослойного функционально-ориентированного покрытия лопатки компрессора, выполняемая на основе нитрид титанового покрытия.

Ключевые слова: газотурбинный двигатель, лопатки компрессора, многослойное покрытие, функциональная ориентация.

В настоящее время газотурбинные двигатели (ГТД) широко используются в авиационной технике, в качестве силовых агрегатов. Это обусловлено высокими технико-экономическими показателями и нетрадиционными эксплуатационными характеристиками ГТД.

В последнее время разработана широкая гамма различных структурных вариантов ГТД для различных летательных аппаратов. Однако, выполненный анализ их работы показал, что в наиболее сложных условиях эксплуатируются вертолетные ГТД. Это обусловлено тем, что их работа характеризуется наличием высокой концентрации пыли, песка, абразивного материала, наличием больших неравномерностей абразивно-эрозионных, температурных, физических, химических воздействий по подсистемам, а также наличием дополнительных узлов и подсистем (свободная турбина) двигателя. Поэтому в данной работе будут рассмотрены вопросы создания технологического обеспечения - именно для вертолетных ГТД [1].

На основании ранее выполненного анализа особенностей структуры и эксплуатации ГТД, а также применяемых технологий изготовления их элементов в работе сделаны следующие основные выводы [2]:

1. ГТД имеет сложную структуру, состоящую из множества элементов и связей между ними.

2. Под действием эксплуатационных воздействий (ЭВ) возникает неравномерный, неравный, неодинаковый, изменяющийся износ элементов структуры ГТД.

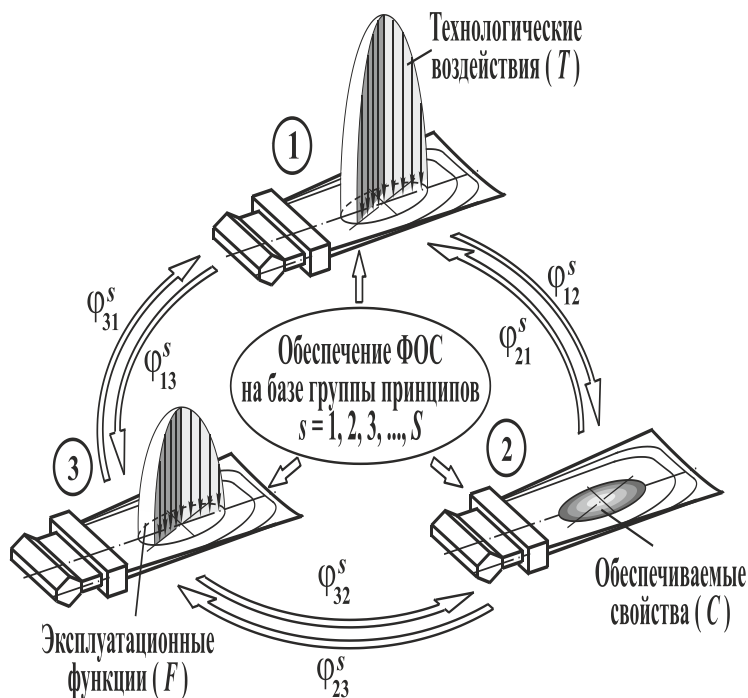
3. Применяемые в настоящее время технологии, технологические процессы и методы не обеспечивают решение вопросов выравнивания ресурса элементов, деталей в группе, групп и подсистем относительно друг друга в ГТД, а также повышения ресурса ГТД в целом, и многократного их восстановления.

4. Для повышения технико-экономических показателей эксплуатации ГТД, работающих в условиях действия неравномерных эксплуатационных воздействий, целесообразно комплексное обеспечение функционально-ориентированных свойств (ФОС) деталей, групп деталей, подсистем относительно друг друга.

5. Для решения вопросов обеспечения ФОС структуры ГТД, работающей в условиях действия неравномерных ЭВ, необходима разработка комплексного (интегрированного) технологического обеспечения ФОС на всех иерархических уровнях структуры ГТД.

Для решения вопросов разработки комплексного технологического обеспечения формирования ФОС структуры ГТД выполнен анализ особенностей формирования ФОС. Этот процесс реализуется на базе функционально-ориентированного подхода [3, 4].

На рис. 1 представлена схема реализации принципа функциональной ориентации эксплуатационных функций F , свойств C (ФОС) и технологических воздействий T . Здесь представлен принцип функциональной ориентации технологического воздействия (позиция 1), обеспечения свойств (ФОС) (позиция 2) в зависимости от особенностей действия эксплуатационной функции (позиция 3). Эти параметры можно моделировать на базе следующей системы отображений (преобразований) [3]:



$$\left. \begin{aligned} \varphi_{12} &: T \rightarrow C ; \\ \varphi_{23} &: C \rightarrow F ; \\ \varphi_{31} &: F \rightarrow T , \end{aligned} \right\}$$

где φ_{12} - отображение (преобразование) технологического воздействия T в свойства C (ФОС);
 φ_{23} - отображение (преобразование) свойств C в зависимости от действия эксплуатационной функции F ;
 φ_{32} - отображение (преобразование) эксплуатационной функции F в технологические воздействия T .

Рисунок 1. Схема реализации принципа функциональной ориентации эксплуатационных функций F , свойств C (ФОС) и технологических воздействий T

При обеспечении ФОС структуры ГТД одной из важнейших характеристик авиационного двигателя является его ресурс $C_k^g = R_k$, а именно установленный,

межремонтный, назначенный и так далее. В этом случае, ресурс элементов структуры ГТД можно представлять следующими выражениями [5, 6]:

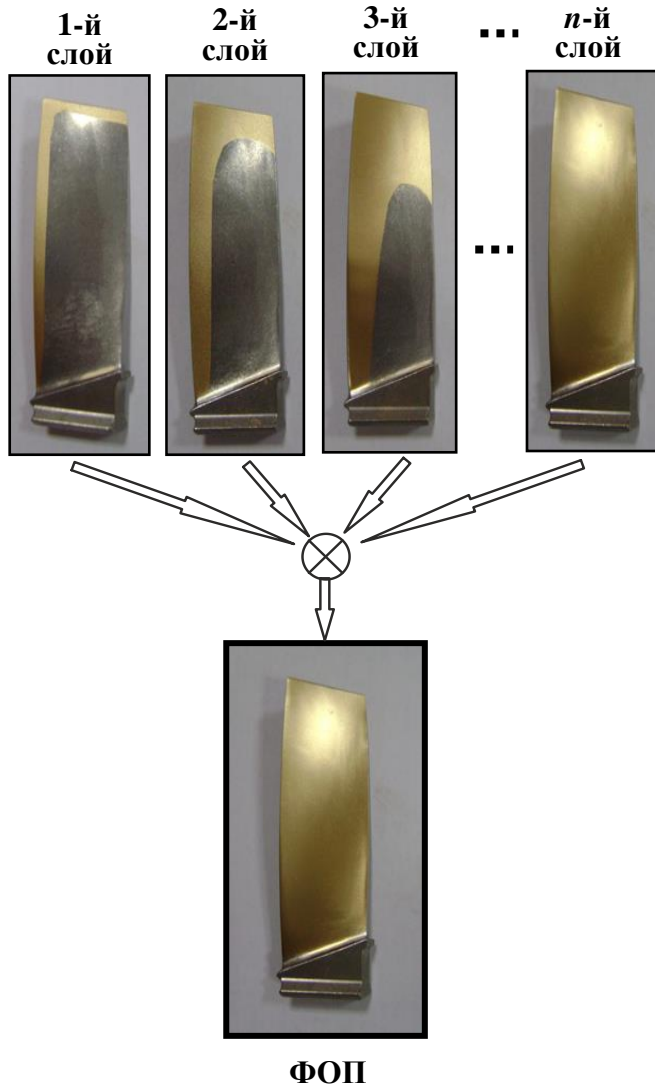
- при обеспечении равного ресурса всех элементов структуры ГТД с ФОС

$$R_1 = R_2 = R_3 = \dots = R_i = \dots = R_n = R ;$$

- при обеспечении кратного ресурса всех элементов структуры ГТД с ФОС

$$k_1 R_1 = k_2 R_2 = k_3 R_3 = \dots = k_i R_i = \dots = k_n R_n = R ;$$

- при обеспечении функционально-зависимого ресурса всех элементов структуры ГТД с ФОС



$$\left. \begin{aligned} R_1 &= f_1(R); \\ R_2 &= f_2(R); \\ R_3 &= f_3(R); \\ &\dots\dots\dots \\ R_i &= f_i(R); \\ &\dots\dots\dots \\ R_n &= f_n(R), \end{aligned} \right\}$$

где R – общий ресурс ГТД.

В этом случае, ФОС структурных элементов ГТД на каждом уровне r структуры - формируются на базе следующих выражений:

$$\left. \begin{aligned} C_1^r &= f_1(F_1^r = F_{\max}^r); \\ C_2^r &= f_2(C_1^r, F_2^r); \\ C_3^r &= f_3(C_1^r, F_3^r); \\ &\dots\dots\dots; \\ C_i^r &= f_i(C_1^r, F_i^r); \\ &\dots\dots\dots; \\ C_n^r &= f_n(C_1^r, F_n^r), \end{aligned} \right\}$$

где $C_1^r, C_2^r, C_3^r, \dots, C_i^r, \dots, C_n^r$ - множество физико-механических свойств соответствующего элемента структуры ГТД на уровне r ;

$F_1^r, F_2^r, F_3^r, \dots, F_i^r, \dots, F_n^r$ - множество эксплуатационных функций действующих на соответствующий элемент структуры ГТД на уровне

Рисунок 2. Схема композиции многослойного ФОП лопатки компрессора, состоящего из n слоев с ПКГ каждого

r ;

$C_i^r = f_i(C_1^r, F_i^r)$ - функциональная зависимость физико-механических свойств i -го элемента r -го уровня структуры ГТД от свойств и эксплуатационных воздействий на первый элемент структуры.

Следует иметь в виду, что ФОС структуры ГТД выполняются в соответствии с иерархической структурой свойств и действием неравномерных ЭВ:

- ФОС 1-го класса;
- ФОС 2-го класса;
- ФОС 3-го класса;
-;
- ФОС R -го класса.

Можно отметить, что процесс реализация ФОС структурных элементов ГТД должен выполняться на базе группы особых принципов ориентации [3] и комплексного многосвязного технологического процесса (КМТП) [6].

На рис. 2 представлена схема композиции многослойного функционально-ориентированного покрытия (ФОП) лопатки компрессора, состоящего из n слоев - с пространственным контуром границ (ПКГ) каждого. В данном случае, данное многослойное покрытие выполнялось на базе нитрид титанового покрытия каждого слоя [4]. В этом случае, многослойное покрытие с ПКГ каждого слоя последовательно наносилось на лопатку пера в соответствии со схемой рис. 4. При этом на базе нескольких слоев покрытия равной толщины каждого, обеспечивалась реализация многослойного покрытия неравной толщины, которая определяется действие неравномерных эксплуатационных функций.

На рис. 3. представлена схема формирования комплексного многосвязного технологического процесса (КМТП) обеспечения ФОС структуры ГТД. Здесь показано, что процесс создания КМТП выполняется следующим образом. Сначала, система ГТД делится (выполняется декомпозиция) на множество деталей (например, по уровням), затем, устанавливаются уровни эксплуатационных связей (например, по интенсивности износа элементов каждого уровня), далее, выполняется синтез k -ой детали-операции (ДО) для j -ой детали (могут быть варианты связных детали-операций (СДО) и просто ДО), устанавливаются уровни технологических связей и производится композиция j -го связного технологического процесса (ТП), составляется множество связных ТП, и потом, на основе операции композиции формируется КМТП обеспечения ФОС структуры ГТД.

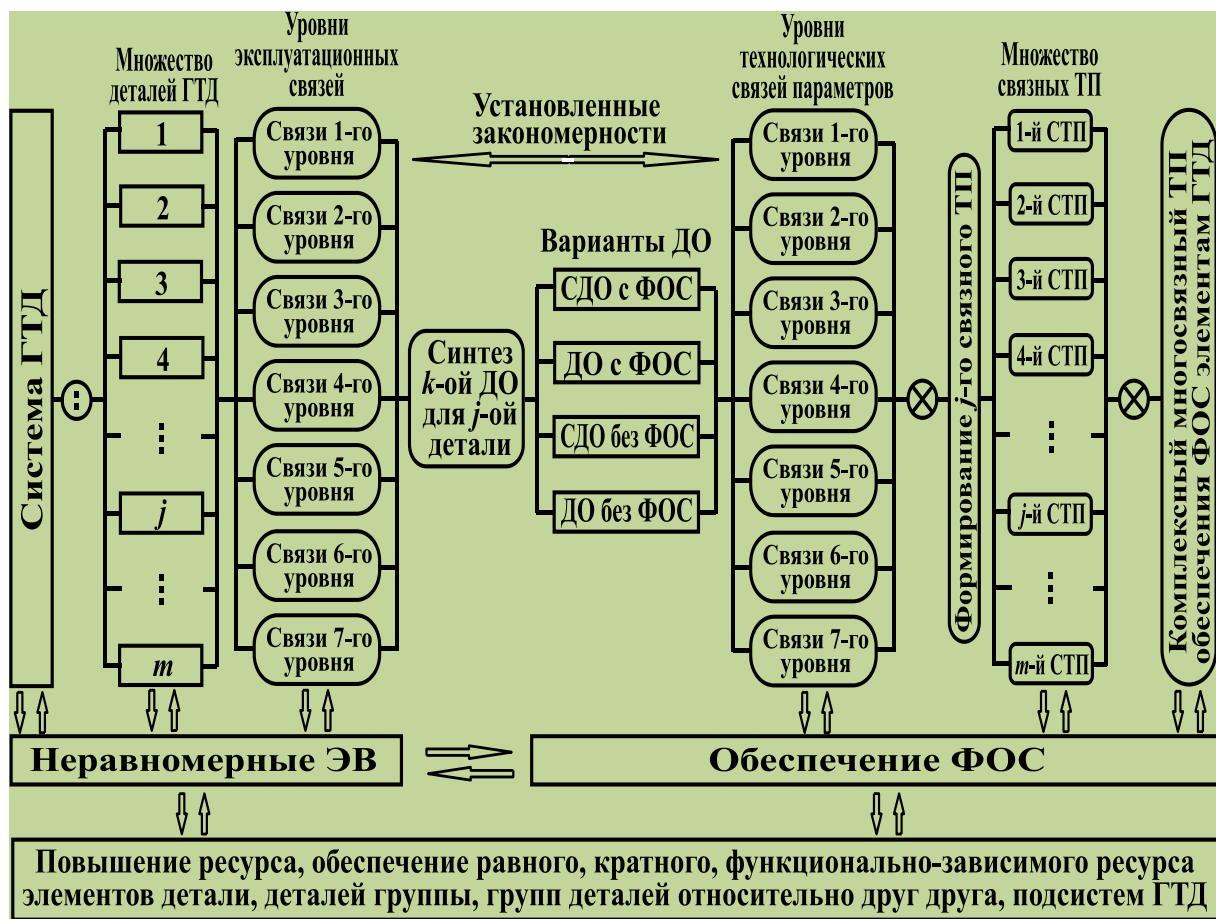


Рисунок 3. Схема формирования комплексного многосвязного технологического процесса обеспечения ФОС структуры ГТД

Таким образом, процесс формирования ФОС должен выполняться на основе обеспечения равного, кратного, функционально-зависимого ресурса элементов детали, деталей группы, групп деталей относительно друг друга и всех подсистем.

В заключении можно отметить, что в представленной работе выполнен анализ особенностей эксплуатации ГТД, при этом установлено, что на структуру ГТД действуют неравномерные эксплуатационные функции, которые приводят к неравномерному абразивно-эрозионному износу элементов структуры авиационного двигателя. Для повышения эксплуатационных показателей ГТД в работе предложено обеспечить ФОС структуры. Для реализации ФОС в работе разработана схема их формирования на базе КМТП обеспечения свойств иерархической структуры двигателя.

Список литературы: 1. Григорьев, В. А. Вертолетные газотурбинные двигатели. / В. А. Григорьев, В. А. Зрелов, Ю. М. Игнаткин и [др.]. – М.: Машиностроение, 2007. – 491 с. 2. Михайлов, Д. А. Основные особенности эксплуатации лопаток компрессора ГТД и классификация их эксплуатационных функций / Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научных трудов. – Донецк: ДонНТУ, 2015. - Вып. 4 (50). - С. 126 - 131. 3. Михайлов, А. Н. Основы синтеза функционально-ориентированных технологий машиностроения : монография / А. Н. Михайлов. – Донецк : ДонНТУ, 2009. – 346 с. 4. Патент № 2718877. Российская Федерация. С23С 14/04. Способ нанесения функционально-ориентированного износостойкого покрытия на лопатку газотурбинного двигателя / А. Н. Михайлов, Д. А. Михайлов, В. А. Михайлов [и др.]. Заявка № 2018107164 от 26.02.2018. – Бюл. № 11, 15.04.2020. – 7 с. 5. Михайлов, Д. А. Некоторые особенности формирования функционально-ориентированных свойств структуры газотурбинного двигателя и связей параметров технологических процессов / Д. А. Михайлов, А. Н. Михайлов, А. А. Колодяжный, Е. А. Шейко // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научных трудов. – Донецк: ДонНТУ, 2021. - Вып. 3 (74). - С. 50 - 64. 6. Михайлов, А. Н. Технологические особенности повышения ресурса деталей газотурбинных двигателей на основе обеспечения функционально-ориентированных свойств / А. Н. Михайлов, Д. А. Михайлов // Инновации в машиностроении: сборник трудов XII Международной научно-практической конференции. – Новосибирск: НГТУ, 2021. - С. 76 – 83.

УДК 621

ОБЩИЙ АЛГОРИТМ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ВАЛА-ШЕСТЕРНИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОБЛАЧНОЙ САПР

Невмывака А. А., Нищерякова М. В., Буленков Е. А.
(кафедра ТМ, ГОУВПО «ДонНТУ», г. Донецк, ДНР)

***Аннотация:** в статье рассмотрены особенности использования облачной САПР для проектирования технологического процесса изготовления вала-шестерни. Представлен общий алгоритм проектирования данного технологического процесса.*

***Ключевые слова:** облачная САПР, Индустрия 4.0, алгоритм проектирования, вал-шестерня.*

Важной задачей производства изделий угольного машиностроения является достижение требуемого критерия качества и эффективности, который может оцениваться по параметру качества, производительности и себестоимости [1, 2]. Для достижения данных критериев необходимо применять научно обоснованные решения, основанные на четком понимании последовательности проектирования технологического процесса изготовления изделия. В то же время, появление новых технологий проектирования, - облачных САПР, - требует корректировки имеющихся методик разработки технологических процессов. Поэтому, разработка общего алгоритма проектирования технологического процесса изготовления деталей машин угольного машиностроения с использованием возможностей современных облачных САПР и баз данных расположенных в глобальной сети является актуальной задачей [3].

Целью выполнения данной работы является разработка общего алгоритма проектирования технологического процесса изготовления вала-шестерни с использованием облачной САПР.

На рисунке 1 представлена блок схема общего алгоритма проектирования технологического процесса производства вала шестерни. Задачей разработки технологического процесс является достижение эффективности по критерию себестоимости производства единицы изделия.

Исходными данными при разработке технологического процесса является чертеж детали и годовая программа выпуска, а также предельные затраты на проектирование технологии и изготовление единицы изделия, выражающие показателем себестоимости изделия.

Первым этапом разработки технологического процесса является разработка 3Д модели и рабочего чертежа детали «вал-шестерня». Данный процесс целесообразно выполнять в облачной системе Fusion 360 поскольку данная программа предоставляет возможность использования внешним модулей для проектирования сложных криволинейных поверхностей в частности зубчатых венцов, а также содержит расширенную базу данных стандартных конструктивных элементов деталей [3]. Также система содержит модуль оценки правильности оформления и соблюдения требований ЕСКД.

Далее на базе структурного синтеза технологических процессов с использованием графов из всех возможных вариантов технологических маршрутов обработки элементарных поверхностей генерируются наиболее рациональные маршруты обработки каждой поверхности, из последовательности которых формируется общий технологический процесс обработки детали.

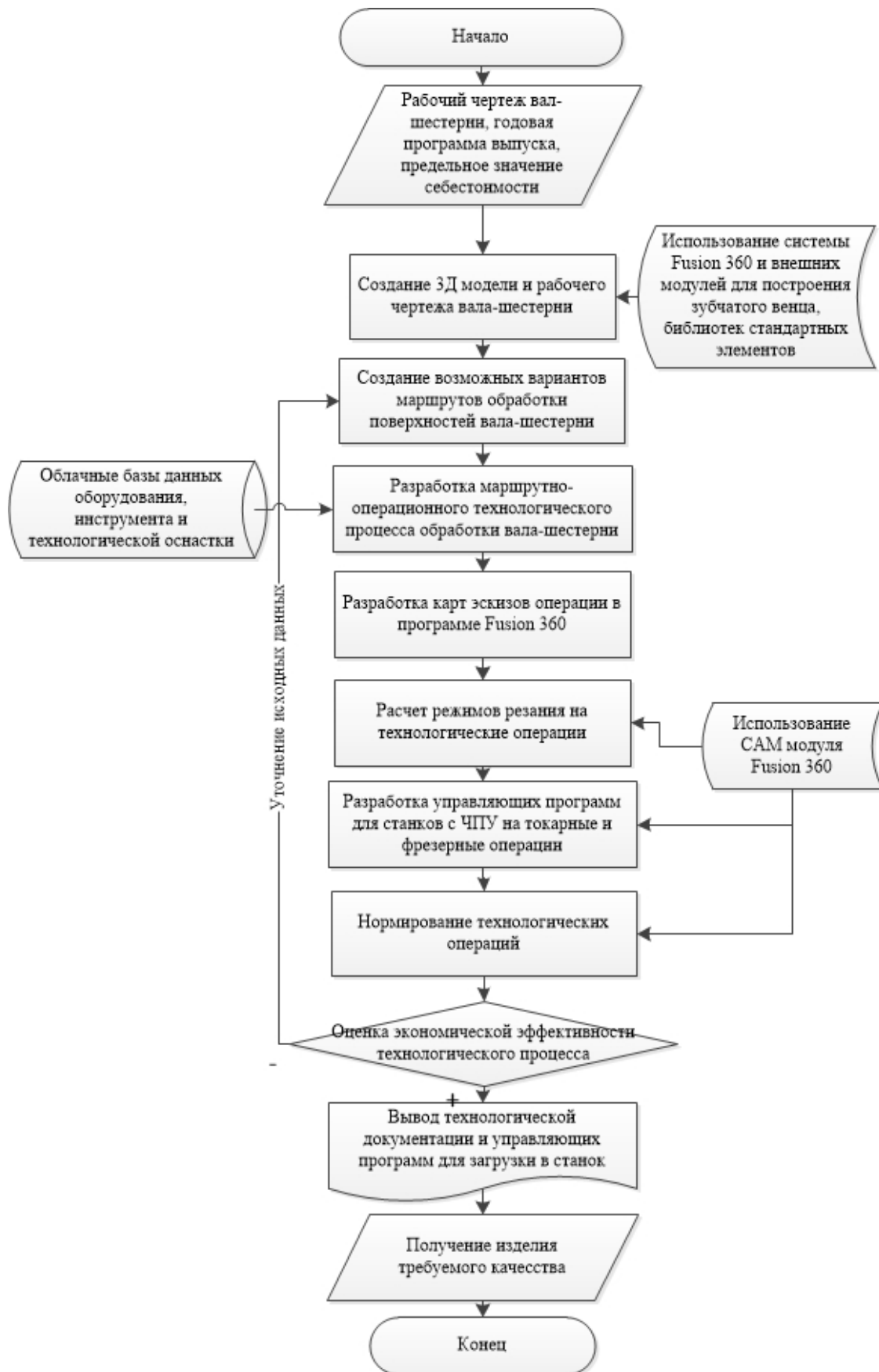


Рисунок 1. Блок схема общего алгоритма проектирования технологического процесса производства вала шестерни.

При разработке общего маршрутно-операционного технологического процесса рационально использование облачных баз данных оборудования и средств технологического оснащения для осуществления каждой операции. После этого также в системе Fusion 360 требуется создать операционные эскизы для обработки детали на операциях технологического процесса. При этом система благодаря использованию шаблонов и эффективных средств построения на основе 3Д модели позволяет значительно упростить данную задачу.

Следующим этапом выполняется расчет и назначение режимов резания на каждую технологическую операцию, разработка управляющей программы для станков с ЧПУ и определение норм времени. Эти процессы эффективно реализуются с использованием САМмодуля Fusion360 [4], содержащие обширную базу данных по определению режимов резания, типовым циклам обработки и по нормам времени на основные и вспомогательные технологические переходы.

После полного составления технологического процесса выполняется оценка эффективности технологического процесса. Данный элемент представлен условным блоком в алгоритме. В случае несоответствия степени эффективности предлагаемого технологического процесса выполняется уточнение исходных данных и переход на блок по созданию возможных вариантов маршрутов обработки элементарных поверхностей, где путем дальнейшего перебора вариантов обработки поверхностей выполняется поиск более эффективных маршрутов обработки поверхностей. После этого дальнейший цикл выполняется повторно.

В случае соответствия экономической эффективности требуемому уровню выполняется вывод результатов разработки в форме представления технологической документации, а также управляющих программ на электронных носителях для их последующей загрузки на станок с ЧПУ.

Результатом разработки технологического процесса по данному алгоритму является получение изделия требуемого качества с технико-экономическими показателями, удовлетворяющими заданному уровню.

Таким образом, разработанный алгоритм проектирования технологического процесса, учитывающий возможности и специфику облачных САПР систем, позволяет эффективно использовать облачные технологии и современные достижения Индустрии 4.0 при разработке технологического обеспечения производства деталей угольного машиностроения.

Список литературы: 1. Проектирование технологических процессов в машиностроении: Учебное пособие для вузов / И.П. Филонов, Г.Я. Беляев, Л.М. Кожуро и др.. – Мн.: УП «Технопринт», 2003. – 910 с. 2. Научные основы технологии машиностроения [Электронный ресурс] : учебное пособие для использования в образовательном процессе образовательных организаций, реализующие программы высшего образования по направлению "Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств" (уровень бакалавриата и магистратуры) / А.С. Мельников, М.А. Тамаркин, Э.Э. Тищенко, А.И. Азарова ; под общ. ред. А.С. Мельникова. - 97 Мб. - Санкт-Петербург : Лань, 2018. - 1 файл. - Систем. требования: Acrobat Reader. - Режим доступа: <http://ed.donntu.org/books/19/cd9443.pdf>3. Autodesk Fusion 360: комплексный подход к цифровому производству. [Электронный ресурс] Режим доступа: – http://isicad.ru/ru/articles.php?article_num=19637. Последнее обращение - 20.05.2021 г. – Загл. скрана. 4. Xi Vincent Wang, Mohammad Givehchi, Lihui Wang (2017) Manufacturing system on the cloud: a case study on cloud-based process planning // Procedia CIRP vol. 63 P.: 39 – 45.

УДК 534.2

АНОМАЛИИ ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ СГУСТКОВ ПОРОШКОВЫХ ЧАСТИЦ С ТВЕРДОЙ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ПРЕГРАДОЙ**Филиппов М.Н., Ушеренко С.М.***(кафедра ПМ,С и ТМ, БНТУ, г. Минск, Республика Беларусь)**Тел. +375295703207; E-mail: maksim_filippov_00@list.ru*

Аннотация. В статье описан физический процесс динамического взаимодействия сгустков порошковых частиц с твердой металлической преградой. При взаимодействии порошковых сгустков со стальными преградами в динамическом режиме наблюдаются эффекты проникания микроударников на глубины в сотни или тысячи размеров исходных частиц. Обнаружены специфические режимы, при которых реализуются условия, обеспечивающие прошивку микрочастицами свинца преграды из углеродистой стали на глубины до 20 мм.

Ключевые слова: сгусток, легирование, структура, твердость, микрочастица.

1. Введение

Процесс легирования деталей на основе стали, как правило, выполняется в жидком агрегатном состоянии. Легирование стали значительно меняет ее исходную структуру, а соответственно и свойства сплавов. Процесс легирования при этом происходит в условиях перемешивания жидких фаз и создания химических соединений. Такой вариант легирования требует, как значительных затрат энергии, так и относительно длительный период времени обработки стали.

При взаимодействии порошковых сгустков со стальными преградами в динамическом режиме реализуется комплекс физических эффектов, которые качественно отличаются от эффектов при легировании в жидком агрегатном состоянии.

Как правило, стали легированные в твердом агрегатном состоянии обладают более высокой твердостью и прочностью по сравнению с прочностью этой же стали в жидком состоянии. В этих условиях за доли секунды наблюдаются эффекты проникания микроударников на глубины в сотни или тысячи размеров исходных частиц.

С позиции аномального процесса внедрения микрочастиц порошкового сгустка в твердое металлическое тело на первой стадии взаимодействия необходимо сформировать зародыши канальных элементов в поверхностных слоях металлической заготовки.

Глубина проникания ядра в преграду не может превышать 6–10 калибров ударника. В экспериментах по прошивке стального образца сгустками микрочастиц (1–100 мкм) внедрение частицы на глубины до 100 мм потребует уменьшение сопротивления материала преграды в 10000 раз или аналогичную величину дополнительной энергии для подталкивания ударника[1]. На этапе формирования на поверхности открытых кратеров.

2. Основное содержание и результаты работы.

Целью настоящей работы является рассмотрение возможных объяснений эффекта динамического переноса частиц в объеме стального твердого тела.

На этапе формирования на поверхности твердого тела открытых микрократеров излишки энергии удара затрачиваются на выброс осколков, на формирование кратера, а иногда на проплавление поверхности и даже, при высоких скоростях соударения, на излучение в открытое пространство.

В массивном металлическом материале дополнительной подталкивание в стальной преграде частицы становится возможным только при условии интенсивного воздействия матричного вещества на тыльную часть ударника. Реализация такого

подталкивания возможно только в импульсном режиме. В закрытой системе, когда микро ударник находится в закрытой полости, импульсный режим подталкивания ударников за счет пульсации вещества в канальной зоне после ударника. Известно, что движение ударника (пули) в воде сопровождается взрывами по траектории движения.

Также известно, что кавитация приводит к появлению на поверхности металла многочисленных взрывных каверн, формированию армирующихся волокон (рисунок 1). Взрывы за ударником, даже в твердом теле объясняют кавитацией. Поскольку, после травления поверхности шлифа волоконные элементы вытравливаются над поверхностью стали, то следует предположить, что химическая активность этих структурных элементов существенно отличается от исходной стали. Обработка стали в твердом состоянии проводилась порошками свинца. Т.е. твердость ударника заведомо ниже, чем твердость стальной преграды.



Рисунок 1. Волокна, формируемые частицами свинца в режиме сверхглубокого проникания

Результаты анализа синтезируемых волоконных элементов показаны в таблице 1.

Таблица 1. Концентрация микроэлементов при СГП (свинец)

№ точки	Fe	Al	Mn	S	Cu	Pb
T2	28,61	13,99	39,17	–	0,55	17,68
T3	48,77	32,22	–	0,28	0,28	19,03
T4	43,32	40,00	–	0,54	0,54	16,11

На основе экспериментальных результатов можно утверждать, что на глубине 22 мм в объеме твердого стального тела сформировались волокна с высокой концентрацией свинца – 17–19 масс %. Высокую концентрацию алюминия в волокне, по-видимому, можно объяснить тем, что ступки свинцового порошка разгонялись в кумулятивной линзе, изготовленной из алюминиевого листа. Очевидно, что высокую концентрацию марганца – 39 масс %, зафиксированную в точке 2 нельзя объяснить только за счет динамического массопереноса. На рисунке 2 после прошивки преграды из стали 10 получена фотография канального элемента, пульсировавшего при проникании на глубине 20 мм.

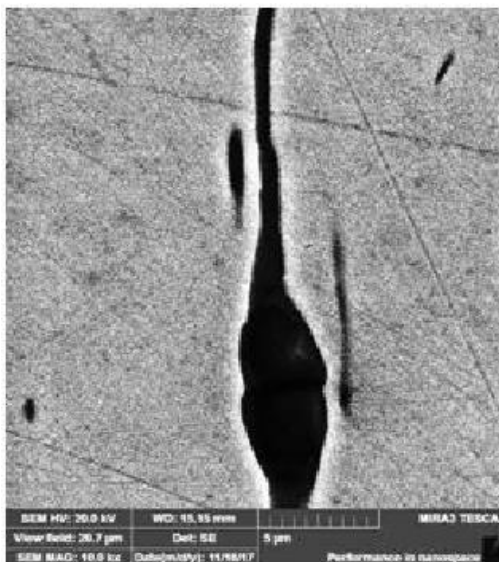


Рисунок 2. Зона пульсации канального элемента в стальной преграде

Многочисленные эксперименты показали, что при динамической обработке стали устойчиво реализуются необычные эффекты. Эти эффекты заключаются в динамическом легировании твердого тела метаемым веществом, которое в начальном этапе находится также в твердом агрегатном состоянии. Главным практическим результатом в данных условиях является преобразование массивного твердого тела в композиционный волоконный материал за доли секунды. Таким образом, технологическая операция, называемая «сверхглубокое проникание», позволяет эффективно легировать по объему и преобразовывать массивную стальную заготовку в композиционный материал [1].

3. Заключение

1. Обнаружены специфические режимы, при которых реализуются условия, обеспечивающие прошивку микрочастицами свинца преграды из углеродистой стали на глубины до 20 мм.

2. Преобразование массивного стального материала в композит возможно при подводе дополнительной энергии к ударнику, как результат многочисленных пульсаций на тыльной поверхности ударника.

Список литературы:1. Ушеренко, С.М. Анализ процесса проникания. Динамическая перестройка структуры материалов. Кол. Монография – НИИ ИП с ОП, Мн.: 2000. – С. 85–100.

УДК 621

ЗАВИСИМОСТЬ ЧАСТОТЫ КОЛЕБАНИЙ ПРИ ТОЧЕНИИ ОТ ГЛУБИНЫ РЕЗАНИЯ

Чернышев Е.А., Блынский Д.А. (каф. ТМ, ДонНТУ, г. Донецк, Россия)

Аннотация. В статье рассмотрено влияние глубины резания на частоту колебаний на примере радиальных колебаний при точении в системе с одной степенью свободы.

Ключевые слова: колебания, вибрации, частота, глубина резания, жесткость.

Процесс резания часто сопровождается вибрациями в системе СПИД, которые влияют на показатели качества детали. Поэтому исследование влияния различных факторов на параметры колебаний позволяет прогнозировать условия работы станка, которые оказывают влияние на качество обработки. Одним из таких факторов является глубина резания.

Чтобы проанализировать влияние глубины резания на частоту колебаний при резании, рассмотрим идеализированную схему точения цилиндрической заготовки (рис. 1), совершающей колебания в радиальном направлении.

Представим заготовку приведенной массой m , а действие жестко закрепленного резца - радиальной силой P_y , обуславливающей радиальные колебания заготовки, коэффициент статической жесткости которой обозначим c . Демпфер изображает потери энергии с коэффициентом вязкого трения (диссипации) b . Радиальной силе противодействуют восстанавливающая сила F_y и сила сопротивления F_c , которые представим прямо пропорциональными перемещению и скорости колебаний соответственно:

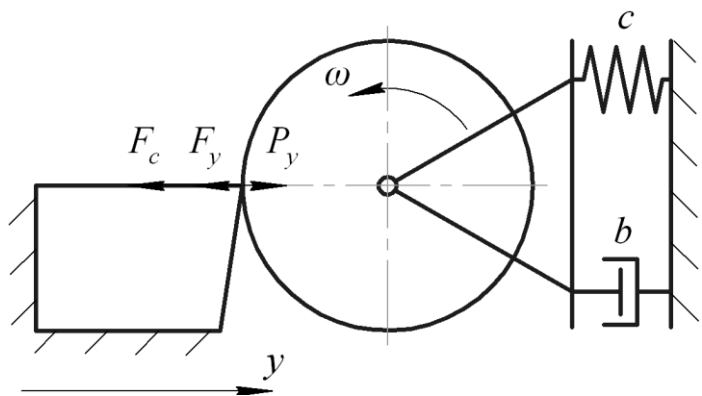


Рис. 1. Схема динамической системы резания с одной степенью свободы в радиальном направлении

$$F_y = cy, \quad F_c = b\dot{y}.$$

Тогда уравнение движения будет иметь следующий вид

$$m\ddot{y} + b\dot{y} + cy = P_y.$$

Составляющую P_y силы резания запишем в виде [1]

$$P_y = 10C_p t^n S^p V^x K_p \quad (1)$$

и представим ее зависящей от радиальных колебаний.

Чтобы рассмотреть влияние мгновенной глубины резания на частоту колебаний при обработке, будем считать глубину переменной, а все остальные величины постоянными, объединив их в коэффициент K , который, согласно (1), запишем в виде

$$K = 10C_p S^p V^x K_p,$$

где C_p, K_p, n, p, x - эмпирические коэффициенты [1].

Тогда сила резания представляется так:

$$P_y = Kt^n,$$

где t - мгновенная глубина резания.

Мгновенную глубину резания можно представить суммой постоянной (номинальной глубины) и переменной частей, т.е. собственно радиальных колебаний заготовки, описываемых функцией y :

$$t = t_0 - y,$$

где t_0 - номинальная глубина резания.

Уравнение движения примет вид

$$m\ddot{y} + b\dot{y} + cy = K(t_0 - y)^n. \quad (2)$$

Пренебрежем в первом приближении потерями энергии, считая $b=0$, и разложим правую часть уравнения (2) в ряд Маклорена до линейного члена. В результате получим

$$m\ddot{y} + cy = Kt_0^n - Knt_0^{n-1}y. \quad (3)$$

Функцию y запишем в виде

$$y = y_1 + y_2,$$

где y_1 - центрированные колебания, y_2 - увод колебаний.

Определим увод колебаний из формулы (3), переписав ее в виде

$$m\ddot{y}_1 + (c + Knt_0^{n-1})(y_1 + y_2) = Kt_0^n.$$

Приравняв коэффициенты при y_1 и y_2 , получим два уравнения

$$\left. \begin{aligned} m\ddot{y}_1 + (c + Knt_0^{n-1})y_1 &= 0, \\ (c + Knt_0^{n-1})y_2 &= Kt_0^n. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Из второго уравнения системы (4) определим увод колебаний:

$$y_2 = \frac{Kt_0^n}{c + Knt_0^{n-1}}.$$

Из первого уравнения системы (4) найдем частоту колебаний:

$$\omega = \sqrt{\frac{c + Knt_0^{n-1}}{m}} \quad (5)$$

Зададимся следующими исходными данными: приведенная масса заготовки $m = 18$ кг, материал заготовки – сталь 40Х, материал режущей части инструмента – Т5К10, вылет заготовки 300 мм, диаметр заготовки 100 мм, геометрические параметры резца: $\alpha = 3^\circ, \gamma = 9^\circ, \beta = 78^\circ, \varphi = \varphi_1 = 45^\circ, \varepsilon = 90^\circ, \lambda = 0^\circ$, размеры державки резца 16×25 мм, радиус скругления при вершине $r = 2$ мм, состояние поверхности заготовки – без корки, Ra 6,3 мкм, стойкость инструмента $T = 45$ мин. Определим частоту вибраций заготовки по формуле (5) при различных значениях глубины резания (от 0,2 мм до 5 мм с шагом 0,2 мм) и коэффициента статической жесткости детали. Результаты вычислений сведем в таблицу 1 (с шагом глубины резания 1 мм) и построим график

(рис. 2), где отношение частот вычислено при наибольшей и наименьшей глубине резания.

Из проведенных расчетов видно, что с увеличением статической жесткости заготовки влияние глубины резания на циклическую частоту радиальных колебаний заготовки уменьшается. Например, при $c = 10^5 \text{ Н/м}$ изменение частоты составляет 15%, а при $c = 10^8 \text{ Н/м}$ - 0,1%. Из этого можно заключить, что глубина резания почти не влияет на циклическую частоту колебаний. Полученные результаты не противоречат опытным данным [2 – 4].

Таблица 1. Зависимость циклической частоты радиальных колебаний заготовки от номинальной глубины резания при различных значениях статической жесткости

Глубина резания t_0 , мм	Циклическая частота ω , рад/с, при коэффициенте жесткости c , Н/м			
	10^5	10^6	10^7	10^8
1	200	298	761	2341
2	194	294	759	2340
3	191	292	758	2340
4	188	291	758	2340
5	186	289	757	2339

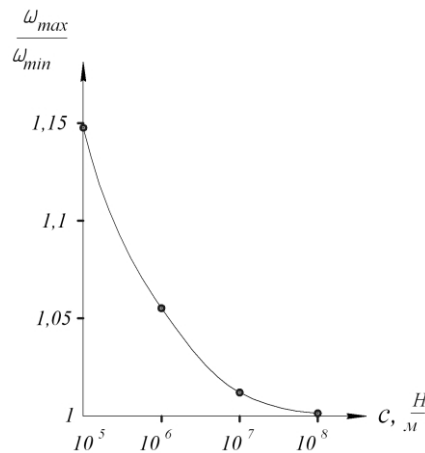


Рис. 2. Зависимость изменения циклической частоты от жесткости детали:

ω_{\max} – циклическая частота при $t_0 = 0,2 \text{ мм}$, ω_{\min} – циклическая частота при $t_0 = 5 \text{ мм}$

Из графика (рис. 2) можно сделать вывод, что статическая жесткость c влияет на частоту в большей степени, чем добавка $Kn t_0^{m-1}$ (см. уравнение (5)), представляющая собой динамическую «жесткость» и включающая в себя глубину резания.

Список литературы: 1. Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х т. Т.2 / Под ред. А.Г. Косиловой и Р.К. Мещерякова.- 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1985. - 496 с. **2.** Каширин А.И. Исследование вибраций при резании металла / А.И. Каширин. - М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1944. – 133 с. **3.** Ильницкий И.И. Колебания в металлорежущих станках и пути их устранения / И.И. Ильницкий. – М.-Свердловск: Машгиз, 1958. – 144 с. **4.** Соколовский А.П. Научные основы технологии машиностроения. – М.-Л.: Машгиз, 1955. – 515 с.

УДК 621

TO THE DESIGN OF RECONFIGURABLE AND BALANCED MULTIPURPOSE ASSISTIVE DEVICES

Ghazaryan S.D.¹, Harutyunyan M.G.²,

¹ (NPUA, Yerevan, Armenia) Tel.: +374(044)228840;

E-mail: sarik.ghazaryan@polytechnic.am

² (NPUA, Yerevan, Armenia) Tel.: +374(093)998840; E-mail: mharut@seua.am

Abstract. Over the past decades, devices for assisting the human musculoskeletal system have been successfully integrated as well into medicine, healthcare and daily life, as into industry, military affairs and astronautics. To ensure the portability of such devices, the static gravity balancing of their links is often done with the use of springs, since having small masses they provide significant force balancing.

In this paper, constructive schemes with different degree of mobility of multipurpose portable devices for human limbs supplementary assisting are suggested, their static balancing methods and approaches which can also be applied in the design of manipulation systems, are given.

Keywords: assistive device, exoskeleton, gravity balancing, spring.

К ПРОЕКТИРОВАНИЮ РЕКОНФИГУРИРУЕМЫХ И УРАВНОВЕШЕННЫХ МНОГОЦЕЛЕВЫХ АССИСТИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ

С.Д. Казарян¹, М. Г. Арутюнян²,

¹ (НПУА, Ереван, Армения) Тел.: +374(044) 22884;

E-mail sarik.ghazaryan@polytechnic.am

² (НПУА, Ереван, Армения) Тел.: +374(093)998840; E-mail: mharut@seua.am

Абстракт. За последние десятилетия устройства ассистирования опорно-двигательному аппарату человека удачно интегрировались как в медицину, здравоохранение и быт/обиход, так и в индустрию, военное дело и космонавтику. Для обеспечения портативности таких устройств часто выполняется статическое гравитационное уравнивание их звеньев при помощи пружин, так как при малой массе они обеспечивают значимое силовое уравнивание.

В статье предложены конструктивные схемы с различными степенями подвижности многофункциональных портативных устройств для вспомогательного ассистирования конечностям человека, приведены методы и подходы к их статическому уравниванию, которые также могут быть применены при проектировании манипуляционных систем.

Ключевые слова: ассистирующее устройство, экзоскелет, гравитационное уравнивание, пружина.

Introduction. Assistive devices, such as exoskeletons and manipulation mechanisms, are the linkage mechanisms that can enhance the functionality of human limbs not only physically, but also quantitatively. Depending on the purpose, these active and/or passive assistive devices can operate in static/quasi-static and dynamic modes and have one or more degrees of mobility (DOF). To statically balance the links from acting gravitational forces and their moments different balancing systems are used [1-5]. In linkage mechanisms, each degree of freedom

needs its own balancing system, hence the increasing of the device mobility requires an increase in the number of such systems. This can alter the portability of the device, but the application of the springs, providing force balancing and having small masses [3, 4] can assure back the portability.

Assistive devices can also be conditionally divided into the "Total" ones - that assist a human whole loco-motional system and have an emphasis on the ground, allowing a person to lift heavy weights, and the "Local" ones - that only distribute the physical loads and weights over the user's body. Previously, the auteurs published different series of total [3, 4] and local [4, 6, 7] assistive devices, such as balanced movable orthoses and exoskeletons for the lower and upper extremities, as well as a multipurpose reconfigurable portable passive-balanced local device with different DOF, designed to hold heavy and uncomfortable objects, tools and firearms in the desired position (Fig. 1 and Fig. 2) [8, 9]. In this paper, the application, modeling, and applied static balancing methods/ approaches are considered for these recently published schemes.

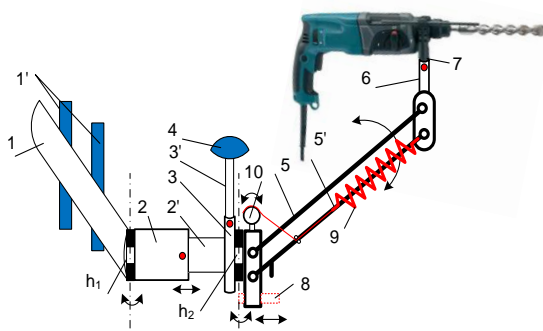


Fig. 1. Industrial assistive device - supporter (with 1 DOF) for the distribution of the weights of heavy instruments [8].

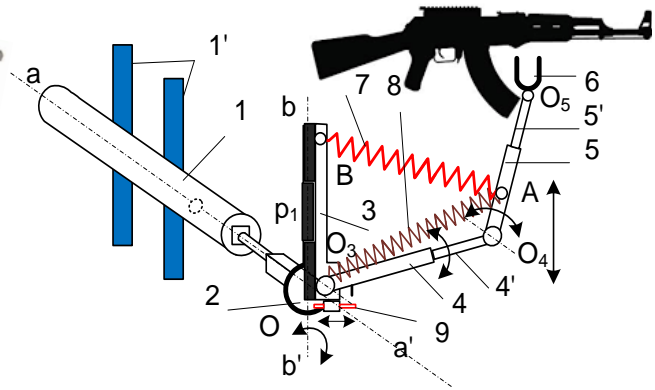


Fig. 2. Military assistive device-stabilizer-supporter (with 2 DOF) for the distribution of the weights of firearms [9].

1. Portable passive 1-DOF balanced assistive device for industrial purposes. The principles of reconfigurability of the portable passive-balanced device-supporter, designed to hold heavy and uncomfortable objects and tools in the desired position are shown in Fig. 3. Here, telescopic links are used to adjust the geometry of the device, as well as coil springs and force adjusting mechanisms for the system balancing and the convenient use of the device.

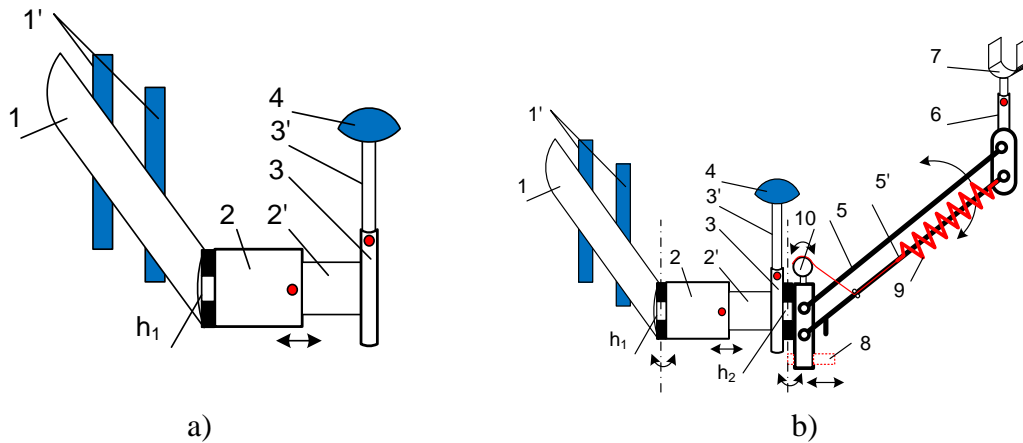


Fig. 3. Reconfigurability of the Industrial assistive device-supporter (with 1 DOF):
 a- lumbar, side and elbow basic support, b- 1 DOF balanced 3rd-hand-support

A lumbar rigid link 1 with weight distribution pillows 1' is attached to the operator's lower back by using a belt and/or a vest-corset. Then, on this link 1 on the right for right-handers, or the left for left-handers, through the h1 hinge, telescopic links are attached: 2-2'- horizontally (lateral support) and 3-3' - vertically (elbow support), an elbow pad 4 is placed on link 3' (see Fig. 3a).

Such a support structure has the right to individual existence, and can find application not only in industry, but also in military affairs to support arms and weapons or ammunition, and also in medicine for supporting an injured or operated arm. If necessary, pad 4 can be easily removed from the elbow support and assistance can be stopped.

To ensure the structural reliability - strength and stiffness conditions - it will be necessary to consider the torsion case in the h1 hinge zone arising by the moment

$$M_{1gtor} = F_{1gmax}l_{h1}, \quad (1.1)$$

formed by gravity force of supported weight F_{1gmax} and lever l_{h1} .

By attaching pantograph 5 (that can also be telescopic) with an adjustable telescopic link 6 to the lateral support through the h2 hinge, a new system can be reconfigured (see Fig. 3b). Link 6 can have various gripping-attachments designed for the required application. To balance the pantograph 5 a linear non-zero initial length cylindrical tension spring 9 is applied [2-5]. The free end of this spring is retracted to a roller regulator by means of a metallic cable; this connection allows varying the force of balancing spring and assuring the condition of the system balance. So now, the pantograph can swing in balance in the angle range $\varphi \in [0^0; 180^0]$, and if necessary, its lowering can be limited using lock 8.

Now we should consider a new torsion case in the h1 hinge zone formed not only by the gravity force F_{1gmax} , but also by the reduced gravity force F'_{2gmax} :

$$M_{2gtor} = (F_{1gmax} + F'_{2gmax})l_{h1}. \quad (1.2)$$

Also, it is important to consider the strength and stiffness conditions for torsion case in the h2 hinge zone formed by the gravity force F_{2gmax} :

$$M_{3gtor} = F_{2gmax}l_{h2max} = F_{2gmax}l_5. \quad (1.3)$$

This gravitational moment is defined as

$$M_{3gtor} = (m_{struc} + m_{supp})l_5g \sin \varphi, \quad (1.4)$$

where $m_{struc} \approx m_5 + m_6 + m_7 + m_9$ is the mass of the construction reduced to the point D; the mass of the spring m_9 can be estimated and/or included in the mass of link 5, or totally excluded by applying the spring remoting technique [5]; $m_{supp} = m_{11}$ is the mass of the supported object, l_5 is the length of the link 5, g is the gravitational constant, φ is the positioning angle of the link 5.

The balancing moment is defined as

$$M_{b9} = F_S r_{XA} = F_S l_{O5A} \sin \gamma \quad (1.5)$$

where F_S is the elastic force of the balancing spring, defined as

$$F_S = F_0 + k(l_S - l_0); \quad (1.6)$$

where k is the stiffness coefficient, l_0 and l_S are the initial and current values of the working length; F_0 is the initial force of the spring. By turning the winding roller 10 with radius r_{10} on an angle β we can assure the desired value of F_0 :

$$F_0 = k\beta\pi r_{10}/180; \quad (1.7)$$

and, in a particular case when

$$F_0 = kl_0 \quad (1.8)$$

the balancing moment can be expressed as

$$M_{b9} = kl_S l_{O5A} \sin \gamma = kl_S l_{O5A} l_{O5B} \sin \varphi / l_S = kl_{O5A} l_{O5B} \sin \varphi. \quad (1.9)$$

The unbalance of the system is estimated by the difference in moments from the gravitational forces of the links 5-7 and supported object 11 and the balancing force of the spring 9:

$$M_u = M_{3gtor} - M_{b9} = ((m_{struc} + m_{supp})l_5g - kl_{O5A}l_{O5B})\sin \varphi. \quad (1.10)$$

So, the system can be considered balanced, when the constant part of this equation is equal to zero:

$$(m_{struc} + m_{supp})l_5g - kl_{O5A}l_{O5B} = 0 \quad (1.11)$$

By solving this equation, we obtain the value of k .

Numerical example 1 - Static balancing of a system with 1-DOF. The system balancing is performed in the case of the following values of the system parameters: $m_5 = 0.2$ kg, $m_6 = 0.1$ kg, $m_7 = 0.1$ kg, $m_9 = 0.2$ kg, $l_5 = 0.5$ m, $l_0 = 0.2$ m, $l_{O_5A} = l_{O_5B} = 0.15$ m, $m_{11} = 10$ kg. We get: $k = 2356$ Nm, $F_0 = 471$ N.

2. Portable passive 2-DOF balanced assistive device for military purposes. The next schema proposed by the authors was a reconfigurable, portable and passive-balanced local exoskeleton designed to hold a firearm during one-handed shooting.

There are three main firearm-shooting positions: standing, kneeling and prone. When shooting from standing and kneeling positions, the shooter should hold the firearm with both hands to ensure the retention and stability of the firearm. But in the case of one-handed shooting, often right hand, the shooter must exert greater efforts to overcome the gravity of the firearm, as well as to compensate for its knockback. To ensure required gripping and firearm stability, it is necessary to use a ground-supported stand for fixed-position shooting, or a local stabilizer for weapons with support on the shooter's back for mobile shooting.

In a local shooter-weapon-support system, it is necessary to provide the stability and balance of the weapon in the profile plane for the targeting fire. The design of a reconfigurable 2-DOF passive-balancing device intended to hold a firearm when firing with one hand from standing, kneeling and prone positions, shown in Fig.4 [9] is suggested for this purpose.

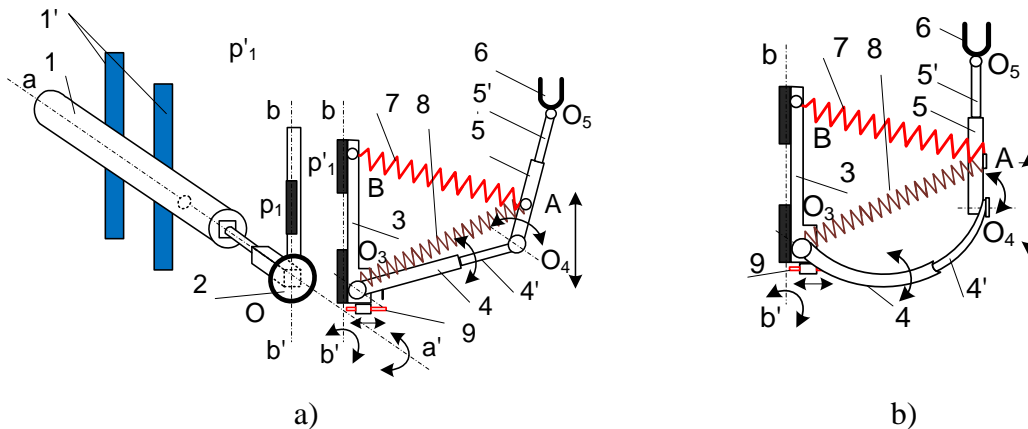


Fig. 4. Reconfigurability of the military assistive device-supporter (with 2 DOF):
a- a principal design, b- 1 DOF balanced 3rd-hand-support,

Here, as before, the telescopic links are used to adjust its geometry and the cylindrical springs are applied for power balancing these links [6-8]. The cylindrical zero-free length springs are used [2-5], and from the system potential energies constancy condition, the "indifferent balancing" is ensured throughout the entire swing range of both swinging links of the assisting device. The lumbar rigid link 1 with weight distribution pillows 1' are attached to the operator's lower back using a belt and/or a vest-corset. In the sleeve, first with a square, and then a circular section of the hole of link 1 on the right, a pin of link 2 is horizontally inserted, respectively, with round and square sections (see Fig. 4). This prevents the action of torque relative to the axis a-a' when the finger of link 2 is fully inserted. Link 3 is connected to the vertical end of link 2 through the hinge p1, which allows the entire subsequent structure to rotate relative to the vertical part of link 2. The authors previously [3, 4] have published the rest part of the

structure, balancing methods and modeling. Thus, links 4 and 5 are telescopic to provide them with the necessary dimensions, according to the individual parameters of the operator and the firearm. Various attachments-grips 6 or hangers can be installed on the link 5' through the hinge O5, specially designed for the required purpose. The balancing is carried out by the linear cylindrical tension 7 and compression 8 springs with zero-free lengths. This system provides exact static balancing of links 4 and 5 over the entire range of the rotation angle $\varphi_{4,5}$. The link 4 rotation can be limited by latch 9, if necessary.

If we make the telescopic link 4 from a strong, but unilaterally flexible material, or give it the necessary curvature (see Fig. 4b), we can ensure a significant increase in the firing sector for the weapon mounted on the proposed device.

Such a structure can easily provide weapon-balanced gripping for shooting from standing and kneeling positions. But for the prone position, the pin of link 2 must be not fully inserted, so the system will be able to rotate about the axis a-a'. The determination of optimal dimensions of the structure, allowing for a convenient and continuous transition from one position to another, can be a new challenge.

The device can be used not only in military applications, for supporting human hands, weapons or ammunition, but also in industry, for maintaining tools or heavy objects, and in medicine, for supporting an injured or already operated human hand.

As mentioned above, to balance the system from gravity forces the linear zero-free length linear cylindrical tension 7 and compression 8 springs are applied [3, 4]. Both springs are connected to link 5 at point A, which is chosen from the following condition:

$$M = 0.5m_4 + m_5 + m_6 + m_f, \quad s_m = (0.5m_5 + m_6 + m_f)l_5/M, \quad (2.1)$$

where l_5 is the length of link 5, s_m is the distance of point A from point O_4 , M is the mass of the rotating links of the system reduced to point A, m_4 , m_5 and m_6 are the mass of correspondent links. m_f is the mass of supported firearm. And the static balancing is realized from the condition of constancy of potential energy of the system:

$$P = P_g + P_{S1} + P_{S2} = \text{const}, \quad (2.2)$$

where P_g is the potential energy of links reduced at point A:

$$P_g = -[M + 0.5(m_7 + m_8)]gl_{O3A} \sin \beta, \quad (2.3)$$

where $m_7 = m_{S1}$ and $m_8 = m_{S2}$ are the mass of the applied springs, β is the angle $XO3A$. The springs are prepared with the same stiffness coefficient k , but as their origins are different, so for the potential energies of springs we can write:

$$P_{S1} = 0.5kl_{S1}^2, \quad P_{S2} = -0.5kl_{S2}^2, \quad (2.4)$$

where l_{S1} and l_{S2} are the current lengths of springs 7 and 8.

From unite resolution of expressions (2.2) - (2.4) we obtain:

$$P = -[M + 0.5(m_7 + m_8)]gl_{O3A} \sin \beta + 0.5kl_{S1}^2 - 0.5kl_{S2}^2. \quad (2.5)$$

From the triangle BAO3 we can see that

$$l_{S1}^2 = l_{O3B}^2 + l_{O3A}^2 + 2l_{O3B}l_{O3A} \sin \beta, \quad (2.6)$$

where l_{O3B} is the distance from point B to point O3, respectively:

$$P = (kl_{O3B} - Mg - 0.5g(m_7 + m_8))l_{O3A} \sin \beta + 0.5kl_{O3B}^2. \quad (2.7)$$

The potential energy rests constant if the following condition is achieved:

$$kl_{O3B} - Mg - 0.5g(m_7 + m_8) = 0. \quad (2.8)$$

By solving this equation, we obtain the value of k.

The numerical example 2 - Static balancing of a system with 2-DOF. The balancing of the system is performed in the case of the following values of the system parameters: $m_4 = 0.6$ kg, $m_5 = 0.2$ kg, $m_6 = 0.1$ kg, $m_f = 6$ kg, $l_4 = 0.4$ m, $l_5 = 0.5$ m, $m_7 = 0.5$ kg, $m_8 = 0.5$ kg, $l_{O3B} = 0.1$ m. We get: $M = 6.5$ kg, $s_m = 0.38$ m, $k = 700$ Nm.

Conclusions. Proposed designs of statically balanced multifunctional and reconfigurable portative adjustable assistive devices can assure the lift and holding in desired/required positions of heavy and uncomfortable objects. It becomes possible due to the adjustability of the system and the use of balancing systems.

Moreover, the applied approaches to the design of balanced devices are quite versatile and can be used in the design of not only assistive devices but also other linkage-based manipulation systems.

Bibliography: **1.** Agrawal S., Fattah A. Gravity-Balancing of Spatial Robotic Manipulators // Mechanism and Machine Theory. - 2004.- Vol.39, No.12.- pp. 1331-1344. **2.** Agrawal A., Agrawal S.K. Design of Gravity Balancing Leg Orthosis Using Non-Zero-free Length Springs // Mechanisms and Machine Theory. - 2005.- Vol. 40, issue 6.- pp. 693-709. **3.** Arakelian V., Ghazaryan S. Improvement of balancing accuracy of robotic systems: Application to leg orthosis for rehabilitation devices // International Journal of Mechanism and Machine Theory. - Elsevier, 2008.- 43(5). - pp. 565-575. **4.** Ghazaryan S.D., Harutyunyan M.G., Arakelyan V.H. Design aspects of human movement assistance - rehabilitation means // Proceedings of the 1st International Conference MES-2018 / IPM-2018 Mechanical Engineering Solutions. Design, Simulation, Testing and Manufacturing. September 17-19, 2018, Yerevan, Armenia, MES-2018-25, pp. 71-80. **5.** Ghazaryan S.D., Harutyunyan M.G., Arakelian V.H. Actual aspects of manipulation mechanism's swinging links spring balancing // XXVI International Scientific and Technical Conference "Mechanical Engineering and Technosphere of the XXI Century", September 23-29, 2019, Sevastopol, - pp. 450-454. **6.** Harutyunyan M.G., Ghazaryan S.D., Zakaryan N.B., Shahinyan S.S. Passive balancing solution for a human walking and sitting assisting exoskeleton // Advanced technologies and mechanical engineering systems; National Technical University of Donetsk, 2019 № 2 (65) pp. 95-99. **7.** Ghazaryan S.D, Harutyunyan M.G., Zakaryan N. B., Arakelian V. Design Concepts for Human

Walking and Sitting Wearable Exoskeletons // Intelligent Technologies in Robotics, October 21-23, 2019, Moscow, Russia. pp. –63-71. **8.** Ghazaryan S. D., Harutyunyan M. G., Zakaryan N. B., Sargsyan Yu. L. Portable passive balanced assistive device for industrial purpose // Progressive Technologies and Systems of Mechanical Engineering. Donetsk National Technical University (Donetsk). Issue: 2 (73) Year: 2021 pp. 42-46. **9.** Ghazaryan S. D., Harutyunyan M. G., Zakaryan N. B., Sargsyan Yu. L. Portable assistive device for military purpose / Proc. of the First International Scientific and Technical Conference "Current Problems of Science and Technology", Sarapul, 2021, May 20 - 22, 2021. pp.142-146.

СОДЕРЖАНИЕ

Ашихмин Д.В., Бараниченко В.В., Русяков Д.В., Шаповалов Д.А., Чеченев А.В. АНАЛИЗ РАЗМЕРОВ ЧАСТИЦ ДРЕВЕСНОЙ ПЫЛИ, ОБРАЗУЮЩЕЙСЯ ПРИ СВЕРЛЕНИИ, С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОМЕНТОВ ФУНКЦИИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ	3
Бараниченко В.В., Бедоидзе М.В., Гуменюк А.С., Русяков Д.В., Цымбалов Д.С. ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВИТАНИЯ РАЗНОРАЗМЕРНЫХ ЧАСТИЦ В ВЕРТИКАЛЬНО ОРИЕНТИРОВАННОМ ДИФфуЗОРЕ	7
Бедоидзе М.В., Гуменюк А.С., Купцова И.С., Милев И.Ю., Русяков Д.В. ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕОМЕТРИИ ПЫЛИ, ОБРАЗУЮЩЕЙСЯ ПРИ ОБДИРОЧНО-ШЛИФОВАЛЬНОЙ ОБРАБОТКЕ ЧУГУНА	14
Горобец И.А., Рудой Е.Р. ПОДГОТОВКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПОВЫШЕНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ШЛИФОВАНИЯ ИЗДЕЛИЙ ИЗ КАМНЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ УЗК	18
Горобец И.А., Лахин А.М., Киселица Д.О., Жарких Д.С. ВЫБОР СТРУКТУРНОЙ СХЕМЫ КОНСТРУКЦИИ 3D-ПРИНТЕР	23
Девойно О.Г., Кардаполова М.А., Луцко Н.И., Пилецкая Л.И., Артюкевич А.В. ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МУЛЬТИМОДАЛЬНЫХ ПОКРЫТИЙ, НАНЕСЕННЫХ ЛАЗЕРНОЙ НАПЛАВКОЙ, В УСЛОВИЯХ СУХОГО ТРЕНИЯ	27
Ладоса Е.Н., Холодова С.Н., Цымбалов Д.С., Яценко О.В. УТОЧНЕНИЕ ОЦЕНОК ВОЗДЕЙСТВИЯ СОВРЕМЕННЫХ ЖИДКОТОПЛИВНЫХ РАКЕТ-НОСИТЕЛЕЙ НА СТРАТОСФЕРНЫЙ ОЗОН	33
Лахин А.М., Скляр В.А., Воронов М.А. ПОВЫШЕНИЕ РЕСУРСА ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС НА ОСНОВЕ НАНЕСЕНИЯ МНОГОСЛОЙНЫХ ПОКРЫТИЙ НА РАБОЧИЕ ПОВЕРХНОСТИ ЗУБЬЕВ	38
Мамолат А.Г., Полтавец В.В. МОДЕЛЬ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ СТАЦИОНАРНОГО КОНСОЛЬНО-ПОВОРОТНОГО КРАНА НА ОСНОВЕ СРЕДСТВ ПАКЕТА MATLAB SIMSCAPE	42
Михайлов Д.А., Михайлов А.Н., Шейко Е.А., Куликович Н.Д., Антонюк Д.Н. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ КОМПЛЕКСНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ФОС СТРУКТУРЫ ГТД	46

Невмывака А. А., Нищерякова М. В., Буленков Е. А. ОБЩИЙ АЛГОРИТМ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ВАЛА-ШЕСТЕРНИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОБЛАЧНОЙ САПР	51
Филиппов М.Н., Ушеренко С.М. АНОМАЛИИ ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ СГУСТКОВ ПОРОШКОВЫХ ЧАСТИЦ С ТВЕРДОЙ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ПРЕГРАДОЙ	54
Чернышев Е.А., Блынский Д.А. ЗАВИСИМОСТЬ ЧАСТОТЫ КОЛЕБАНИЙ ПРИ ТОЧЕНИИ ОТ ГЛУБИНЫ РЕЗАНИЯ	57
Ghazaryan S.D., Harutyunyan M.G. TO THE DESIGN OF RECONFIGURABLE AND BALANCED MULTIPURPOSE ASSISTIVE DEVICES	60

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ

1. Текст рукописи статьи до 3 страниц формата А4 (210x297 мм) с полями: **верхнее и нижнее 30 мм, левое и правое 25 мм.** Рукопись статьи оформить с применением редактора WinWord шрифтом Times New Roman размером 12ю распечатать в двух экземплярах с высоким качеством печати

2. Порядок оформления. Материалы должны отвечать следующей структурной схеме: УДК, название, фамилии и инициалы авторов, сокращенное название кафедры и организации, города, страны, основной текст, выводы, список литературы. Название печатать прописными (жирными) буквами, без переносов, центрировать. Через 1 пустую строку строчными буквами – фамилии и инициалы авторов (жирными), рядом в круглых скобках курсивом – сокращенное название кафедры и организации, города, страны (строку центрировать). Через 1 пустую строку – материалы статьи (язык изложения – по выбору авторов), межстрочный интервал 1, **с переносом слов.** См. образец оформления материалов.

3. 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 нумеруются (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.

Размер Формул Для Microsoft Equation

Full (обычный).....	12 pt
Subscript/Superscript (крупный индекс).....	10 pt
Sub-Subscript/Superscript (мелкий индекс).....	8 pt
Symbol (крупный символ).....	12 pt
Sub-Symbol (мелкий символ).....	10 pt

4. Графический материал (рисунки, графики, схемы) следует выполнять 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: «Рис. 3. Схема устройства.» Рисунки отделяются от основного текста интервалом.

5. Таблицы должны иметь названия и порядковый номер и располагаться после упоминания по тексту, например: «Таблица 2. Классификация муфт.» Таблицы отделяются от основного текста интервалом.

6. Список литературы должен быть приведен в конце статьи в соответствии с образцом. Перечень ссылок должен быть составлен в порядке упоминания в тексте. Ссылки на литературу заключаются в квадратные скобки.

7. Материалы, не отвечающие перечисленным требованиям, а также поступившие в редакционную коллегию с опозданием, опубликованы не будут.

Образец оформления материалов:

УДК 621.01(06)

ОСНОВЫ СТРУКТУРНОГО СИНТЕЗА СБОРОЧНЫХ СИСТЕМ

(пустая строка)

Иванов И.И., Петров П.П. (гр. ИТМ-14, кафедра ТМ, ДонНТУ, г. Донецк, РФ)

(пустая строка)

Аннотация. В статье приведены данные по структурному синтезу сборочных уравнений описывающих процесс сборки изделий. (курсив, 6 ...8 строк)

Ключевые слова: структура технологии, синтез, процесс, сборка. (курсив, 5 слов)

(пустая строка)

1. Введение

Во введении необходимо представить литературный обзор современного состояния вопроса исследования, показать актуальность работы, поставить цель и определить задачи исследований (0,5 страницы).

(пустая строка)

2. Основное содержание и результаты работы

Для сборки изделий широко применяются технологические системы [1]

.....

..... информационные и другие потоки (рис. 5) могут быть описаны

(пустая строка)

3. Заключение

Таким образом, выполненные исследования позволили реализовать следующее:

..... отличительной особенностью данной методики.

(пустая строка)

Список литературы: 1. Ким И. П. Исследование эффективности роторных машин / И.П. Ким. – К.: КПИ, 1985. – 123 с. 2. Устюгов А. В. Надежность технологических машин / А. В. Устюгов. – Донецк: ДонНТУ, 1998. – 425 с.

АДРЕС РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ:

Редакционная коллегия журнала «Инженер», кафедра «Технология машиностроения», ДонНТУ, ул. Артема, 58, г. Донецк, 283001, ДНР, РФ.

Тел. моб.: +7 949 3060879.

E-mail: tm@fimm.donntu.ru или mntk21@mail.ru <http://tm.donntu.ru>

Председатель редакционной коллегии – А. Н. Михайлов, тел. моб.: +7 949 3060879

Зам. председателя – Е. А. Чернышев

Ученый секретарь – А.М. Лахин