

Вып. 4 (71)'2020 **ПРОГРЕССИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ МАШИНОСТРОЕНИЯ**



ISSN 2073-3216  
(E) ISSN 2518-7120

**ДОНЕЦКИЙ  
НАЦИОНАЛЬНЫЙ  
ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ**

## **ПРОГРЕССИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ МАШИНОСТРОЕНИЯ**

**Международный  
сборник научных трудов**

**Выпуск 4 (71)' 2020**



**ДОНЕЦК - 2020**

ISSN 2073-3216  
(E) ISSN 2518-7120

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

---

*Посвящается 100-летию юбилею ДОННТУ*

## **ПРОГРЕССИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ МАШИНОСТРОЕНИЯ**

Международный сборник научных трудов

Основан в декабре 1994 года

Выходит 4 раза в год

**Выпуск 4 (71)' 2020**

**Донецк – 2020**

## УДК 621.01(06)

Рекомендован к изданию Ученым Советом Донецкого национального технического университета (протокол № 2 от 26 июня 2020 г.)

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

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

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

Издается при содействии **Международного союза машиностроителей**

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

Адрес редакции: ДНР, 83001, г. Донецк, ул. Артема, 58, ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ, кафедра ТМ. Тел.: +38 062 301-08-40,

E-mail: [tm@fimm.donntu.org](mailto:tm@fimm.donntu.org), Сайт: <http://ptsm.donntu.org>

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

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

**ISSN 2073-3216**

**ISSN 2518-7120 (E)**

© Авторы статей, 2020  
© ГОУВПО «ДОННТУ», 2020

УДК 675.55

**Г. А. Бахадиров**, д-р техн. наук, профессор,

**Г. Н. Цой**, канд. техн. наук, ст. научный сотрудник,

**А. М. Набиев**, мл. научный сотрудник

*Институт механики и сейсмостойкости сооружений им. М.Т. Уразбаева АН РУз,*

*г. Ташкент, Узбекистан*

*Тел./факс: (+99871) 262-71-52; E-mail: [instmech@rambler.ru](mailto:instmech@rambler.ru)*

## **ОТЖИМ МОКРОГО КОЖПОЛУФАБРИКАТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВЛАГООТВОДЯЩЕГО СУКНА**

*В статье приведены результаты экспериментальных исследований по определению влияния скорости пропуска, давления прижима отжимных валов на количество удаленной влаги из мокрого кожполуфабриката из двойной бычины среднего развеса после хромового дубления. Получены уравнения регрессии зависимости количества удаленной влаги (в процентах) от скорости пропуска и давления прижима отжимных валов.*

**Ключевые слова:** *валковая машина, отжимные валы, кожполуфабрикат, опорная плита.*

**G. A. Bahadirov, G. N. Tsoy, A. M. Nabiev**

### **WRINGING OF WET LEATHER SEMI-FINISHED PRODUCT USING DEHUMIDIFYING CLOTH**

*In the article provided the results of experimental studies, where determined the effect of skipping speed, squeeze pressure of squeeze shafts on the amount of moisture removed from wet leather semi-finished product from double bovine middle weight by weight after chrome tanning. The regression equations for the dependence between the amount of removed moisture (in percent) on the pass rate and the pressure of the squeeze rolls are obtained.*

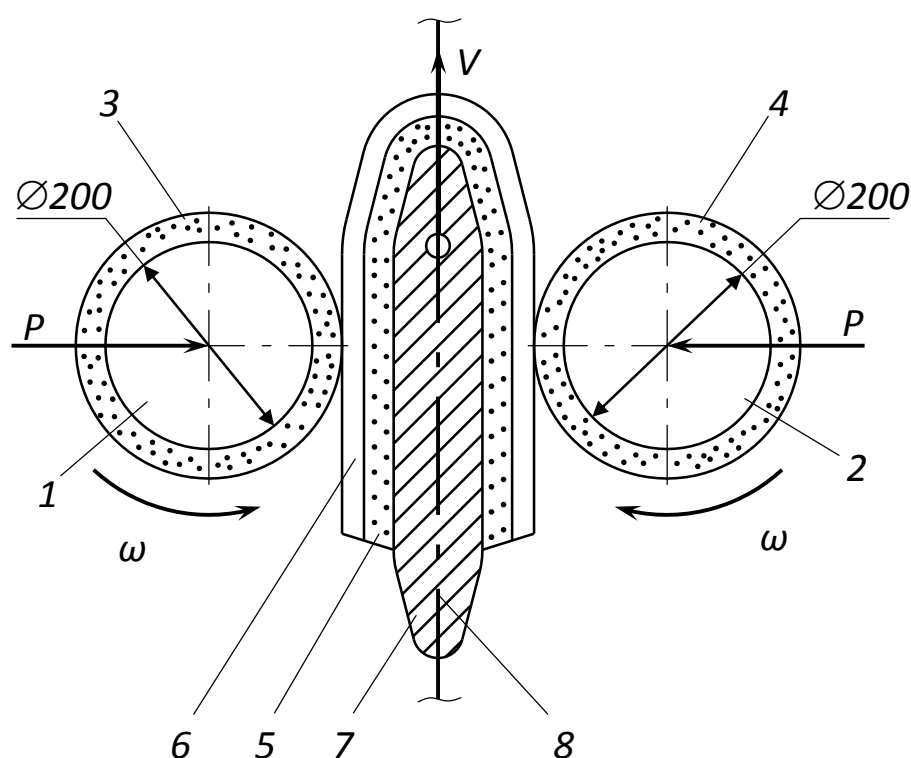
**Keywords:** *roll machine, squeeze shafts, leather semi-finished product, cover, base.*

Повышение эффективности технологического процесса отжима влагонасыщенных материалов является актуальным для кожевенной отрасли и данному направлению посвящено много работ [1-4]. В этой работе нами проведены экспериментальные исследования по определению влияния влагоотводящего сукна при отжиме мокрого кожполуфабриката при их вертикальной подаче на опорной плите между заранее вращающимися отжимными валами.

Эксперимент проводился на специальном стенде, где отжимные валы установлены горизонтально, на которые натянуты покрышки из влагоотводящего сукна – моншоны марки БМ, а опорная плита изготовлена из металла с толщиной 0,005 м, шириной 0,1 м и длиной 0,3 м (рис. 1). В рассмотренном технологическом процессе пакет составляет один мокрый кожполуфабрикат и одно сухое влагоотводящее сукно – моншон марки БМ.

Для проведения эксперимента брали двойную бычину среднего развеса, после хромового дубления. Согласно Международному стандарту ИСО 2588-85 выбрано необходимое количество кожполуфабриката по формуле  $n = 0,2\sqrt{x}$ , где  $x$  – число кожполуфабриката для эксперимента, из партии взяли 2500 шт., тогда  $n = 10$  шт. Из этих 10 образцов вырезали резакон полосы поперек хребтовой линии размером 0,05×0,25 м и пронумерованные полосы комплектовали в группы по 5 шт. по схеме [5].

При эксперименте на металлическую опорную плиту устанавливали мокрый кожполуфабрикат, а затем полосу из влагоотводящего сукна марки БМ толщиной 0,008 м в один слой, в целом их суммарная толщина составляет 0,012 м. До и после отжима взвешивали образцы на лабораторных весах ВЛТЭ-500, с дискретностью 0,01 г (ISO-9001).



1, 2 – отжимные валы, 3, 4, 5 – влагоотводящие материалы (БМ), 6 – слой кожполуфабриката, 7 – опорная плита, 8 – транспортирующая цепь

Рисунок 1. Схема осуществления процесса отжима мокрого кожполуфабриката между валами

Использовали метод D-оптимального планирования второго порядка с использованием матрицы плана К.Кано [6]. На основе априорной информации изучали процесс удаления влаги с учетом двух факторов:  $x_1$  – давление прижима отжимных валов  $P$ , кН/м;  $x_2$  – скорость пропуска  $V$ , м/с и был выбран диапазон изменения давления прижима отжимных валов от 32 до 96 кН/м; скорость отжимных валов от 0,17 до 0,34 м/с; количество слоя кожполуфабриката одно, на основе анализа конструкций различных отжимных валковых машин.

Выбран диаметр отжимных валов 0,2 м с покрышками толщиной 0,008 м из влагоотводящего сукна марки БМ, покрытие металлической опорной плиты в один слой из влагоотводящего сукна марки БМ (с толщиной 0,008 м) между кожполуфабрикатом и опорной плитой. Перед проведением эксперимента методами математической статистики было выбрано необходимое количество измерений (число повторностей), которое обеспечивало требуемую точность.

Рабочую матрицу составили по матрице плана К. Кано для двухфакторного эксперимента. Кодирование факторов осуществляли по следующей формуле

$$x_i = \frac{c_i - c_{i0}}{t_0},$$

где  $x_i$  - кодирование значения факторов;  $c_i$ ,  $c_{i0}$  - натуральные значения фактора на текущем и нулевом уровнях;  $t_0$  - натуральное значение интервала варьирования фактора.

Функции цели аппроксимированы полиномом

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i,j=1}^k b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^k b_{ii} x_i^2,$$

где  $y$  - количество удаленной влаги в кодированном виде;  $b_0, b_i, b_{ij}, b_{ii}$  - коэффициенты регрессии.

Уровни и интервалы варьирования факторов эксперимента приведены в табл. 1.

Таблица 1. – Уровни и интервалы варьирования факторов

Показатель	Кодированное значение факторов	Натуральные значения факторов	
		$x_1$ , кН/м	$x_2$ , м/с
Верхний уровень	+	96	0,340
Нулевой уровень	0	64	0,255
Нижний уровень	-	32	0,170
Интервал варьирования		32	0,085

Результаты замера до и после отжима влаги из кожполуфабриката при различных значениях усилий прижима  $x_1$  ( $P$ ) и скорости  $x_2$  ( $V$ ) приведены в таблице 2.

Таблица 2. – Экспериментальные данные по отжиму влаги из мокрого кожполуфабриката

№	$P, x_1$	$V, x_2$	$y_1, \text{гп}$		$y_2, \text{гп}$		$y_3, \text{гп}$		$y_4, \text{гп}$		$y_5, \text{гп}$	
			$y_{н1}$	$y_{к1}$	$y_{н2}$	$y_{к2}$	$y_{н3}$	$y_{к3}$	$y_{н4}$	$y_{к4}$	$y_{н5}$	$y_{к5}$
1	0	0	88,3	58,8	93,9	59,0	79,6	55,2	87,5	55,0	87,7	54,7
2	+	+	77,7	50,5	74,5	50,3	80,0	53,8	82,7	56,5	91,5	63,4
3	-	+	85,1	68,7	91,0	61,2	90,1	65,5	78,0	55,5	92,6	68,9
4	-	-	72,7	53,3	65,0	47,0	95,5	61,5	73,2	42,9	86,1	57,3
5	+	-	84,5	57,8	97,4	57,8	69,0	39,8	70,7	40,0	88,8	59,5
6	+	0	88,4	59,5	80,1	52,9	98,2	63,2	72,9	48,8	98,0	60,5
7	0	+	70,1	51,2	76,1	50,1	75,8	52,3	62,8	43,8	94,2	66,2
8	-	0	87,0	62,7	95,5	63,8	71,8	49,3	62,0	44,3	80,2	60,1
9	0	-	81,6	55,4	87,5	57,7	76,5	47,0	75,0	48,7	84,9	54,1

$y_n$  – начальный вес образца мокрого кожполуфабриката;

$y_k$  – вес образца кожполуфабриката после отжима.

После реализации рабочей матрицы получены средние арифметические значения (табл. 3).

Таблица 3. – Матрица планирования эксперимента

№	$P, x_1$	$V, x_2$	Результаты измерений (в %)							$\sum_1^n (y - \bar{y})^2$	$S_{ош}^2$	$y_p$	$\bar{y} - y_p$	$(\bar{y} - y_p)^2$
			$y_1$	$y_2$	$y_3$	$y_4$	$y_5$	$\bar{y}$						
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	

1	0	0	33,5	37,2	30,6	37,1	37,6	35,2	37,42	9,355	33,6	0	0
2	+	+	35,0	32,5	32,7	31,6	30,7	32,5	10,34	2,585	32,2	0,3	0,09
3	-	+	19,3	32,7	27,3	28,8	25,6	26,7	96,74	24,185	26,6	0,1	0,01
4	-	-	26,7	27,7	35,6	41,4	33,4	32,9	145,27	36,3175	31,9	1,0	1
5	+	-	31,6	40,7	42,3	43,4	33,0	38,2	118,66	29,665	37,9	0,3	0,09
6	+	0	32,7	30,4	35,6	33,0	38,3	34,0	37,9	9,475	35,2	1,2	1,44
7	0	+	25,5	33,5	31,0	30,3	28,2	29,7	36,27	9,0675	30,5	0,8	0,64
8	-	0	27,9	33,2	31,3	28,5	25,1	29,2	39,40	9,85	29,8	0,6	0,36
9	0	-	32,1	44,1	38,5	35,0	36,3	35,2	22,96	5,74	36,3	1,1	1,21
										Σ 544,96	Σ		
											136,24		
												Σ 4,84	

Однородность дисперсии проведена с помощью критерия Кохрена [6] при доверительной вероятности  $\alpha=0,95$ . Зная общее число оценок дисперсии  $N$  и число степеней свободы  $f=k-1$  вычисляем по таблице 3, а из [6] находим  $G_T=0,358$ , при  $N=9; f=k-1=5-1=4$ ;

$k$  – число параллельных опытов.

$$S_{ош}^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n-1}, \quad \sum_{i=1}^N S_i^2 = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{y}_i)^2}{N(n-1)},$$

$$G_P = \frac{S_{\max}^2}{\sum_{i=1}^N S_i^2} = \frac{36,3175}{136,24} = 0,2666.$$

$G_P=0,2666 < G_T=0,358$ .

Следовательно, результаты исследования воспроизводимы.

Определяем коэффициенты регрессии  $b_0, b_i, b_{ij}, b_{ii}$  из таблицы 3.33 [7].

Для слоя кожполуфабриката в кодированном виде  $b_0 = 33,62507; b_{11} = -1,08618; b_{12} = 2,69415; b_{22} = -0,23721; b_2 = -2,92649; b_{12} = 0,125$ .

Получим следующее уравнение регрессии в кодированном виде:

Для слоя кожполуфабриката

$$y = 33,62507 - 1,08618 \cdot x_1^2 - 0,23721 \cdot x_2^2 + 2,69415 \cdot x_1 - 2,92649 \cdot x_2 + 0,125 \cdot x_1 x_2.$$

Подставляя вместо  $x_1 = \frac{P - 64}{32}$ , где  $P$  – усилие прижима отжимных валов и

$x_2 = \frac{V - 0,255}{0,085}$ , где  $V$  – скорость пропуска мокрых кожполуфабрикатов между враща-

ющимися отжимными валами получили в натуральном виде уравнение удаленной влаги из мокрого кожполуфабриката между вращающимися отжимными валами.

Гипотезу об адекватности полученных уравнений проверили с помощью критерия Фишера при доверительной вероятности  $\alpha=0,95$  [6].

$$F_p = \frac{S_{ад}^2}{S^2\{y\}} < F_T,$$

где  $S_{ад}^2$  – остаточная дисперсия, или дисперсия адекватности;  $S^2\{y\}$  – дисперсия воспроизводимости.

Из таблиц 1 и 2 определим  $S_{ad}^2$  и  $S^2\{y\}$ . Для первого слоя кожполуфабриката:

$$S_{ad}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N n \cdot (\bar{y} - y_p)^2}{N - \frac{(k+2)(k+1)}{2}} = \frac{5 \cdot 4,84}{3} = 8,067,$$

$$S^2\{y\} = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^n (y - \bar{y})^2}{N(n-1)} = \frac{544,96}{36} = 15,14.$$

Критерий Фишера об адекватности модели:

$$F_p = \frac{S_{ad}^2}{S^2\{y\}} = \frac{8,067}{15,14} = 0,5328,$$

где  $N$  – общее число опытов;  $k$  – число факторов;  $n$  – число повторений в опыте;  $y_i$  – результат отдельного наблюдения;  $\bar{y}$  – средние арифметические значения результата опыта;  $y_p$  – расчетные значения критерия по уравнению регрессии.

$$F_p = \frac{S_{ad}^2}{S^2\{y\}} < F_T; \quad F_p = 0,5328 < F_T = 2,88.$$

Итак, уравнение регрессии можно считать пригодным с 95 %-ной доверительной вероятностью, которое в именованном виде после раскодировки имеет вид:

Для слоя кожполуфабриката:

$$\Delta W = 31,2869 - 0,001061 \cdot P^2 - 32,8304 \cdot V^2 + 0,0730 \cdot P - 20,6272 \cdot V + 0,0460 \cdot P \cdot V.$$

Построен график зависимости количества удаленной влаги  $\Delta W$  из мокрого кожполуфабриката (в %) при различных скоростях пропуска  $V$  и давлений прижима отжимных валов  $P$  (рис. 2).

Результаты экспериментов показывают, что разница удаленной влаги из первого слоя и второго слоя кожполуфабрикатов незначительная. С уменьшением усилия прижима отжимных валов  $P$  уменьшается количество удаленной влаги  $\Delta W$  из обработанного кожполуфабриката. Для исследуемого образца кожполуфабриката бычины среднего развеса для готовых кож верха обуви максимальная влажность в полах достигает 73%, а в чепраке до 65%.

А остаточная влажность в кожполуфабрикате после отжима должна быть в пределах 55 – 60% в зависимости от типа кож.

В данном случае экспериментального исследования остаточная влажность должна быть в порядке 60%. Следовательно, нам необходимо удалить максимум 13% влаги при отжиме на валковой машине. Из этого следует, что можно будет отжимать излишнюю влагу из мокрого кожполуфабриката при скорости пропуска 0,34 м/с и давлении отжимных валов от 32 до 96 кН/м.



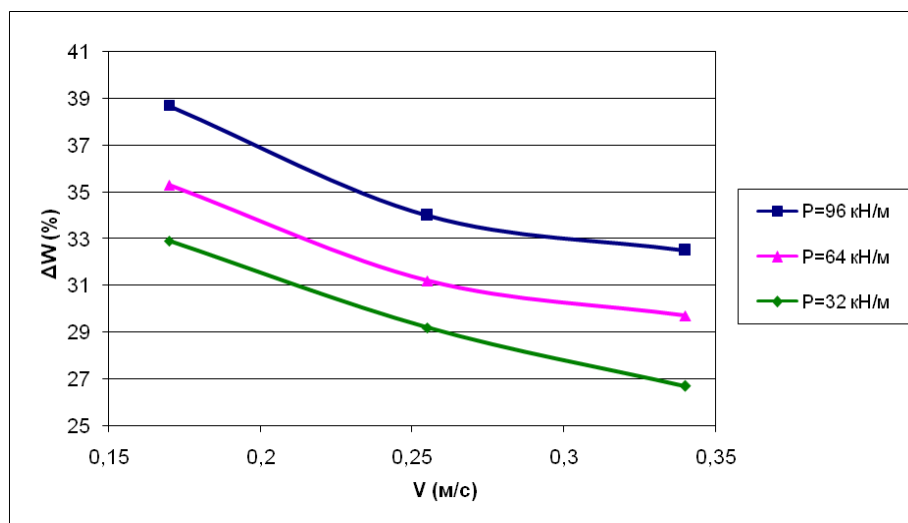


Рисунок 2. Зависимость количества удаленной влаги  $\Delta W$  от скорости пропуска  $V$  кожполуфабриката при давлении прижима отжимных валов при  $P=32$  кН/м,  $P=64$  кН/м,  $P=96$  кН/м

Анализ результатов эксперимента показывает, что можно увеличить скорость пропуска кожполуфабриката больше чем 0,34 м/с. Следовательно, эксперименты необходимо продолжить для определения предельных скоростей пропуска для каждого из трех давлений прижима отжимных валов, для обеспечения остаточной влажности кожполуфабриката до 60%.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Ершов, С. В. Динамическое нагружение валковой пары для интенсификации процесса отжима. дис. ... канд. техн. наук / С. В. Ершов. – Иваново, 2013. – 130 с.
2. Дарда, И. В. Разработка теоретических основ совершенствования технологического оборудования кожевенно-мехового производств: дис. ... докт. техн. наук / И. В. Дарда – Москва, 2004. – 325 с.
3. Бахадиров, Г. А. Условия деформирования листового материала с постоянной массой между валковой парой / Г.А. Бахадиров, М. У. Мусиров, А. М. Набиев // Автоматизация и измерения в машино- приборостроении: Научный журнал. – ФГАОУВО "Севастопольский государственный университет", 2019. – №2 (6) – С. 20-25.
4. Amanov, A., Bahadirov, G., Amanov, T., Tsoy, G., & Nabiev, A. (2019). Determination of Strain Properties of the Leather Semi-Finished Product and Moisture-Removing Materials of Compression Rolls. *Materials*, 12(21), 3620. doi:10.3390/ma12213620.
5. Головтеева, А. А. Лабораторный практикум по химии и технологии кожи и меха / А. А. Головтеева, Д. А. Куциди, Л. Б. Санкин. – Москва: Легкая и пищевая промышленность, 1982. – 309 с.
6. Тихомиров, В. А. Планирование и анализ эксперимента / В. А. Тихомиров. – М.: Легкая индустрия, 1974. – 283 с.

Поступила в редколлегию 22.04.2020 г.

УДК 666.762.1

**С. В. Гусаров**, аспирант, **Н. А. Хорт**, **К. Б. Подболотов**, канд. техн. наук,  
Физико-технический институт НАН Беларуси, г. Минск, Беларусь  
Тел./Факс: +375(017)36998762; E-mail: [husarau@mail.ru](mailto:husarau@mail.ru)

## ПРИМЕНЕНИЕ ФОСФАТНЫХ СВЯЗУЮЩИХ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ВИБРОЛИТЫХ ОГНЕУПОРНЫХ КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ОТХОДОВ ПРОИЗВОДСТВА И ВТОРИЧНЫХ РЕСУРСОВ

*В работе показана возможность получения огнеупорных керамических материалов методом вибролитья с использованием фосфатного связующего с низкими затратами на производство и высокими физико-химическими и термомеханическими характеристиками за счет использования вторичных ресурсов. Установлены зависимости прочности и плотности огнеупоров от соотношения исходных компонентов и их гранулометрического состава, а также температуры обжига. Показано, что наиболее эффективно использовать состав с содержанием 60-70 % алюмосиликатного шамота (70 % от 0,5 до 1 мм и 30 % <0,2 мм), 30-40 % муллитсодержащих отходов (<0,315 мм), 10 % ортофосфорной кислоты от массы сухой смеси.*

**Ключевые слова:** огнеупорные материалы, муллитсодержащие отходы, алюмосиликатный шамот, прочность, термостойкость.

**S. V. Husarau, N. A. Khort, K. B. Podbolotov**

## APPLICATION OF PHOSPHATE BINDERS FOR PRODUCTION OF VIBROLITE REFRACTORY CERAMIC MATERIALS WHEN USING PRODUCTION WASTE AND SECONDARY RESOURCES

*The paper shows the possibility of obtaining refractory ceramic materials by vibrocasting using a phosphate binder with low production costs and high physico-chemical and thermomechanical characteristics due to the use of secondary resources. The dependences of the strength and density of refractories on the ratio of the starting components and their particle size distribution, as well as firing temperature, are established. It was shown that it is most effective to use a composition with a content of 60-70% aluminosilicate chamotte (70% from 0.5 to 1 mm and 30% <0.2 mm), 30-40% of mullite-containing waste (<0.315 mm), 10% orthophosphoric acid by weight of the dry mixture.*

**Keywords:** refractory materials, mullite-containing wastes, aluminum silicate fireclay, strength, heat resistance.

### 1. Введение

В настоящее время почти все отрасли промышленности, связанные с высокотемпературными процессами, применяют огнеупорные материалы. В машиностроении огнеупорные изделия в основном используют в различных тепловых агрегатах (горелочные камни, подовые блоки нагревательных печей, блоки свода электропечей, «бойные» места сталеразливочных ковшей, донные брусья, футеровка) [1]. Применяемые в машиностроении огнеупоры должны обладать высокой механической прочностью, способностью противостоять резким изменениям температуры, сопротивляемостью к воздействию шлаков и газов, невысокой теплопроводностью и теплоемкостью, а также стабильностью размеров в период эксплуатации. Наиболее доступными и распространенными является огнеупорные изделия на основе алюмосиликатного наполнителя (шамот, андалузит) [2].

Формование огнеупорных изделий преимущественно производится способами полусухого прессования и вибролитья. Изделия, полученные методом прессования, имеют наибольшую механическую прочность, однако данный метод применим только при формовании изделий простой формы. Для изготовления крупногабаритных изделий и изделий сложной конфигурации целесообразно применять метод вибролитья.

Преимуществом этого метода является то, что для получения огнеупорных изделий не требуется наличия сложного и дорогостоящего оборудования. Суть данного метода заключается во ведении в состав смеси ограниченного количества связующего, которое при механическом воздействии способствует приобретению ей тиксотропных свойств [3]. Невысокое содержание связующего в составе смеси позволяет без ухудшения высокотемпературных свойств использовать различные огнеупорные заполнители [4]. При получении вибролитых огнеупоров на основе фосфатных связующих необходимо учитывать физико-химические процессы, проходящие в изделии: твердение (до 300 С), упрочнение (300-1000 С) и спекание (свыше 1000 С). При разработке состава огнеупорного изделия наибольшая трудность возникает при выборе оптимального соотношения крупных и мелких фракций заполнителей. При использовании только крупной фракции структура огнеупорного изделия будет пористой и со слабой связью между отдельными частицами. Однако снижение количества крупной фракции заполнителя приводит к увеличению расхода вяжущего и водотвердого отношения, повышает огнеупорную усадку. Для выбора оптимального соотношения фракционного состава компонентов известно несколько способов позволяющих рассчитать гранулометрический состав заполнителя [5]. Так, для получения наиболее плотной структуры шамотных огнеупоров часто используется соотношение: крупной и мелкой фракции 7:3 в двух фракционной смеси; крупной, средней и мелкой фракции 6:3:1 в трех фракционной смеси. Однако, ввиду того что частицы заполнителя и введенных добавок имеют различную форму (округлая и игольчатая) целесообразно в каждом отдельном случае находить это соотношение экспериментально.

На данный момент в Республике Беларусь нет специализированных производств огнеупорных изделий, ввиду этого предприятия в основном используют импортную продукцию. В этой связи одним из важных направлений в производстве огнеупорных материалов является разработка технологии получения огнеупорных материалов с использованием отходов производства и вторичных ресурсов.

## 2. Материалы и методы

Для получения огнеупорных материалов в данной работе применяли следующие компоненты: шамот марки ША, ортофосфорную кислоту (ГОСТ 6552), муллитсодержащие отходы в виде измельченного боя (<0,315 мм) форм предназначенных для литья жаропрочных сплавов. По данным рентгенофазового анализа муллитсодержащие отходы состоят из муллита ( $Al_6Si_2O_{13}$ ), примеси оксида кремния ( $SiO_2$ ), а также отмечается присутствие аморфной фазы. Структура представлена игольчатыми образованиями фазы муллита и зернами оксида кремния, сцементированными аморфной составляющей. Введение муллитсодержащих отходов должно способствовать увеличению механической прочности, поскольку возможно армирование структуры материала игольчатыми образованиями муллита, входящего в состав отходов.

Кажущуюся плотность, водопоглощение и открытую пористость испытуемых образцов определяли в соответствии с ГОСТ 2409. Прочность образцов на сжатие определяли согласно ГОСТ 4071.1. Усадку образцов при сушке и обжиге определяли в соответствии с ГОСТ 5402.

Термостойкость огнеупорного материала определяли в лабораторных условиях. Сущность метода заключалась в определении количества теплосмен (нагревов и резких охлаждений), которые могут выдержать образцы до определенной степени его разрушения (до потери 20 % массы образца). Образцы помещались в лабораторную печь типа СНОЛ предварительно разогретую до 850 °С, и выдерживались при этой температу-

ре 10-15 мин. Время отсчитывалось с момента, когда в печи устанавливалась необходимая температура. По истечении времени образцы вынимались из печи и погружались в ванну с проточной водой (5-20 °С) на глубину более 50 мм. Охлаждение образцов осуществлялось 5 мин, затем их вынимали из воды и выдерживали на воздухе при комнатной температуре 5-10 мин. Далее циклы нагрева и охлаждения повторяли до потери 20 % от массы образца. Если термостойкость образцов превышала 100 теплосмен испытания прекращались и определялась их остаточная прочность при сжатии.

Сырьевую смесь готовили смешиванием исходных компонентов в сухом виде с последующим добавлением 85 %-го раствора ортофосфорной кислоты в количестве 10 % от массы сухой смеси. Полученную массу выдерживали 20 мин после чего увлажняли массу смеси до придания ей тиксотропных свойств. Образцы формовали в виде цилиндров высотой и диаметром 36 мм в пластмассовых формах методом вибролитья. Образцы спекали на воздухе при температурах 1100, 1200 и 1300 °С, со скоростью подъема температуры 5 °С/мин и выдержкой при максимальной температуре 1 ч после предварительной сушки при температуре 110 °С. Схема изготовления огнеупорных материалов представлен на рисунке 1.

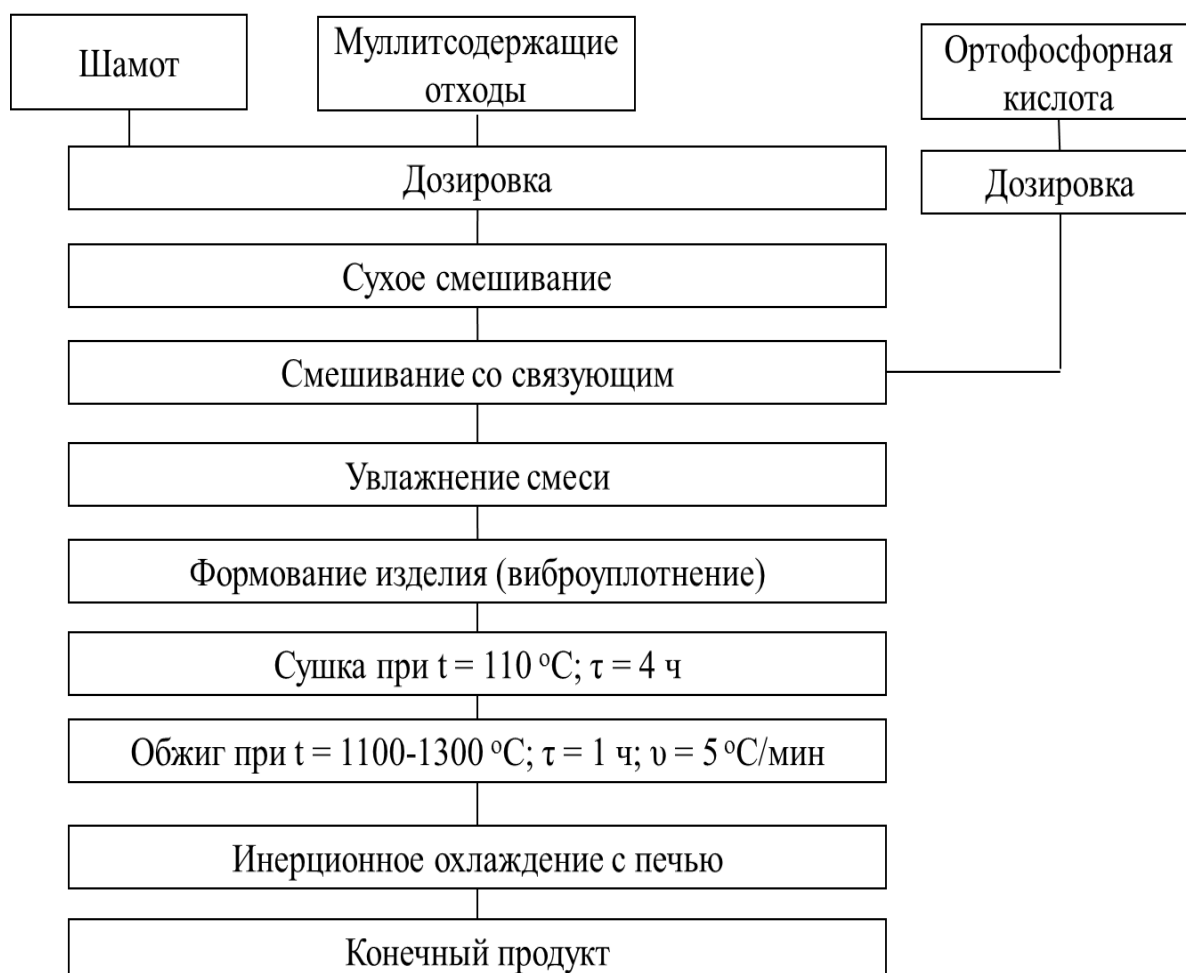


Рисунок 1. Схема получения огнеупорных материалов

### 3. Результаты и выводы

Применение фосфатных вяжущих позволяет получать материалы, обладающие улучшенными прочностными и термомеханическими характеристиками, так как при взаимодействии муллитсодержащих отходов с ортофосфорной кислотой происходит образование фосфатов алюминия, которые играют роль высокотемпературного связующего. Образование фосфатных соединений  $Al(H_2PO_4)_3$  подтверждено данными рентгенофазового анализа материала, полученного при обработке муллитсодержащих отходов ортофосфорной кислотой в сушильном шкафу при температуре 120 °С. Данные РФА высушенных при температуре 200 °С продуктов взаимодействия представлены на рисунке 2.

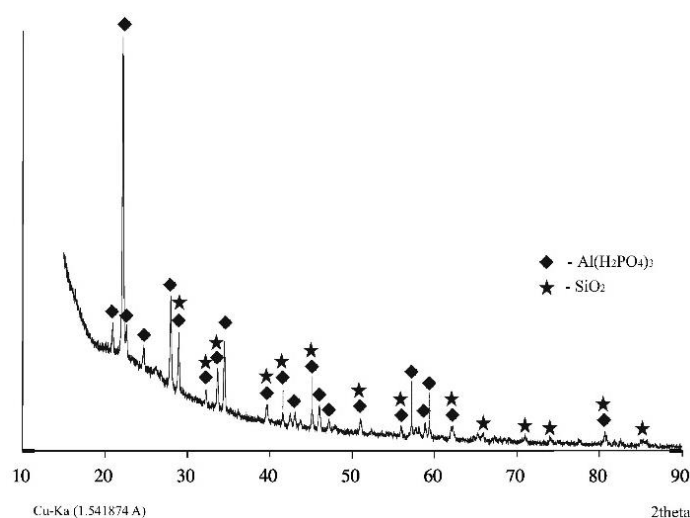


Рисунок 2. Дифрактограмма продуктов взаимодействия между муллитсодержащими отходами и ортофосфорной кислотой

Для исследований были выбраны составы, содержащие 50–90 % алюмосиликатного шамота, 10–50 % муллитсодержащих отходов и 10 % ортофосфорной кислоты от массы сухой смеси.

При проведении экспериментальной работы установлена зависимость прочности и плотности материала от соотношения исходных компонентов и гранулометрического состава заполнителя (рисунок 3).

Показано, что при увеличении содержания в составе смеси отходов до 40 %, за счет армирования структуры игольчатой составляющей муллитсодержащих отходов и более плотной упаковки частиц, происходит повышение плотности и прочности материала. Дальнейшее увеличение содержания муллитсодержащих отходов (более 40 %) ведет к снижению прочности и плотности материала, а также повышению усадки после обжига. Это объясняется увеличением в составе смеси мелкой фракции, что при одинаковом увлажнении смеси приводит к торможению процессов уплотнения при вибролитье из-за образования высоковязкой малотекучей массы.

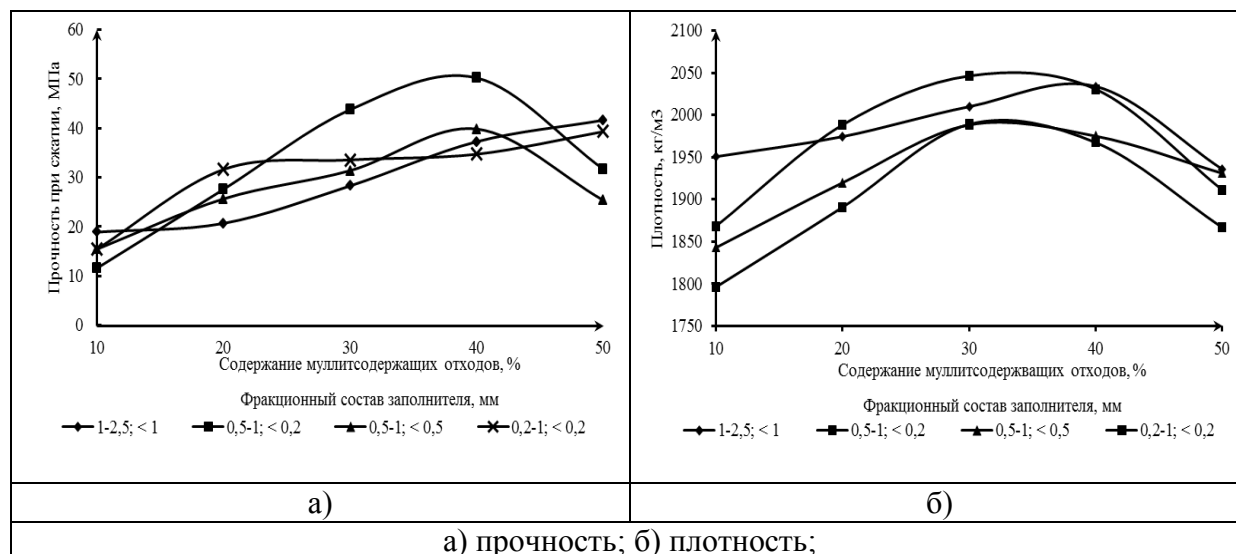


Рисунок 3. Зависимость физико-химических свойств огнеупорных изделий от фракционного состава заполнителя и различного содержания муллитсодержащих отходов, обожжённых при температуре 1300 °С

При исследовании влияния фракционного состава компонентов шихты на физико-химические и термомеханические характеристики были исследованы образцы, в которых заполнитель (шамот) имел следующее соотношение крупной и мелкой фракции:

- 1) 70 % крупной (от 1 мм до 2,5 мм) и 30 % мелкой (<1 мм) фракции;
- 2) 70 % крупной (от 0,5 мм до 1 мм) и 30 % мелкой (<0,2 мм) фракции;
- 3) 70 % крупной (от 0,5 мм до 1 мм) и 30 % мелкой (<0,5 мм) фракции;
- 4) 70 % крупной (от 0,2 мм до 1 мм) и 30 % мелкой (<0,2 мм) фракцией.

Из выше приведенных на рисунке 3 данных видно, что при применении состава смеси, имеющей 70 % фракции 0,5–1 мм и 30 % фракции <0,2 мм происходит повышение прочности и плотности материала вследствие более плотной упаковки частиц при виброуплотнении. Получаемые огнеупорные материалы имеют после сушки предел прочности при сжатии 35 МПа. Проведенные испытания на термостойкость показали, что изготовленный на основе данного состава материал, обожженный при температуре 1300 °С способен выдержать более 100 теплосмен (850 °С – вода). Потеря прочности материала после 100 теплосмен составляет 50 %.

Проведенные исследования показали, что для производства огнеупорных керамических материалов методом вибролитья на фосфатном вяжущем рекомендованное соотношение компонентов составляет: 60-70 % алюмосиликатного шамота (70 % от 0,5 до 1 мм и 30 % <0,2 мм), 30–40 % муллитсодержащих отходов (<0,315 мм), 10 % ортофосфорной кислоты от массы сухой смеси. Получаемые огнеупорные материалы, обожженные при температуре 1300 °С обладают следующими свойствами: плотность 2030–2050 кг/м<sup>3</sup>; открытая пористость 20,5 %; предел прочности при сжатии 44–51 МПа; водопоглощение 10 %, усадка 0,8 %, термостойкость более 100 теплосмен (850 °С – вода).

#### 4. Заключение

В работе показана возможность изготовления огнеупорных керамических материалов методом вибролитья на основе алюмосиликатного наполнителя (шамота) и муллитсодержащих отходов. Использование недорогого и общедоступного заполнителя на

основе вторичных ресурсов и отходов производствам позволяет получать огнеупорные материалы с низкими затратами на производство и высокими физико-химическими и термомеханическими характеристиками.

При проведении экспериментальной работы установлены зависимости прочности и плотности материала от соотношения исходных компонентов и их гранулометрического состава. Показано, что наиболее эффективно использовать состав с содержанием 60-70 % алюмосиликатного шамота (70 % от 0,5 до 1 мм и 30 % <0,2 мм), 30-40 % муллитсодержащих отходов (<0,315 мм) и 10 % ортофосфорной кислоты от массы сухой смеси.

Получаемые огнеупорные материалы имеют после сушки предел прочности при сжатии 35 МПа, обожженные при температуре 1300 °С обладают следующими свойствами: плотность 2030–2050 кг/м<sup>3</sup>; открытая пористость 20,5 %; предел прочности при сжатии 44–51 МПа; водопоглощение 10 %, усадка после обжига 0,8 %, термостойкость более 100 теплосмен (850 °С – вода).

Разработанные составы огнеупорных материалов могут быть использованы для изготовления различных элементов тепловых агрегатов (горелочные камни, подовые блоки нагревательных печей, блоки свода электропечей, «бойные» места сталеразливочных ковшей, донные брусья, футеровка), а также при формовании крупногабаритных огнеупорных изделий сложной конфигурации. Применение ортофосфорной кислоты в качестве связующего позволяет получать материалы, обладающие улучшенными прочностными и термомеханическими эксплуатационными характеристиками, так как образуются фосфатные соединения, которые играют роль высокотемпературного связующего.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Щербакова, Н. Н. Производство крупноразмерных изделий из огнеупорных бетонов на ОАО «Семилукский огнеупорный завод» / Н. Н. Щербакова, Г. С. Росихина, И. В. Мурзин. – Огнеупоры и техническая керамика, 2007. – №12. – С. 39-40.
2. Кашеев, И. Д. Разработка огнеупорных бетонов алюмосиликатного и глиноземистого составов для тепловых агрегатов черной металлургии / И. Д. Кашеев, С. А. Поморцев, А. А. Ряплова. – Новые огнеупоры, 2014. – №17. – С. 15-17.
3. Соков, В.Н. Термостойкий корундовый бетон, армированный волокнами алюминия, синтезируемыми в матрице при обжиге. Часть 3. Выбор рациональных компонентов для получения корундового бетона / В. Н. Соков, С. Д. Сокова. – Новые огнеупоры, 2014. – № 7. – С. 49-51.
4. Косенко, Н. Ф. Спекание алюмооксидных материалов / Н. Ф. Косенко. – Известия вузов. Химия и химическая технология, 2011. – Т. 54. – № 8. – С. 3-16.
5. Пивинский, Ю. Е. Огнеупорные бетоны нового поколения. Виброреология. Вибрационные методы уплотнения и формования / Ю. В. Пивницкий. – Огнеупоры, 1994. – № 7. – С. 2-11.

Поступила в редколлегию 15.04.2020 г.

УДК 621.791.3:669.248.8

**А. В. Звягинцева**, канд. техн. наук

Воронежский государственный технический университет, Россия

Тел./Факс: 89507501062; E-mail: [zvygincevaav@mail.ru](mailto:zvygincevaav@mail.ru)

## ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ КОМПОЗИТЫ В ПРИЛОЖЕНИЯХ МАШИНОСТРОЕНИЯ

*Проведено сравнение технологических процессов получения хромовых покрытий никель-бор по экологическим характеристикам, технологическим параметрам (выходу по току, режимам электролиза, скорости осаждения, кроющей способности электролита, шероховатости поверхности), и по ряду физико-механических свойств (внутренним напряжениям, микротвердости, наводороживанию, термостойкости). Совокупность физико-механических характеристик показывает возможность использования композита Ni-B как альтернативного хромовому покрытию на ряде изделий приборостроения и машиностроения.*

**Ключевые слова:** композит никель-бор, машиностроение, функциональные свойства, выход по току режимы электролиза, скорость осаждения, кроющая способность электролита, шероховатость поверхности, физико-механические свойства (внутренние напряжения, микротвердость, наводороживание, термостойкость).

**A. V. Zvyagintseva**

## FUNCTIONAL COMPOSITES IN MECHANICAL ENGINEERING APPLICATIONS

*The comparison of technological processes for obtaining Nickel-boron chrome coatings by environmental characteristics, technological parameters (current output, electrolysis modes, deposition rate, electrolyte coverability, surface roughness), and a number of physical and mechanical properties (internal stresses, microhardness, hydrogenation, heat resistance). The combination of physical and mechanical characteristics shows the possibility of using Ni-B composite as an alternative to chrome coating on a number of instrument and mechanical engineering products.*

**Keywords:** Nickel-boron composite, mechanical engineering, functional properties, current output, electrolysis modes, deposition rate, electrolyte coverability, surface roughness, physical and mechanical properties (internal stresses, microhardness, hydrogenation, heat resistance).

### 1. Введение

Одно из главных мест в гальваническом производстве традиционно принадлежит защитно-декоративному хромированию наиболее применяемого в технологиях машиностроительной области различного профиля. Первые сведения о получении электролитического хрома появились еще в 1905 году в работе [1]. Наиболее широко Cr(VI) применяется в качестве коррозионно-защитного хроматного слоя на оцинкованных стальных поверхностях. Например, в автомобильной промышленности в среднем используется от 4 до 8, а иногда даже свыше 10 г Cr(VI) на один автомобиль. Шестивалентный хром входит в состав коррозионностойких, защитных, конверсионных хроматных покрытий (пленок), которые наносят на детали транспортных средств, таких, как крепежные детали, кронштейны, скобы, рычаги, элементы сцепления, подвески, валы и другие технические приложения. Он может, выделяется в ходе литья, плавления, факельной резки хромосодержащих сталей и из красителей (хроматы натрия и калия и бихроматы аммония и калия). Хроматы цинка и хрома являются канцерогенными веществами. Помимо канцерогенных свойств соединения Cr(VI) обладают очень высокой окислительной и коррозионной активностью. ПДК в воздухе рабочей зоны в пересчете на Cr(VI) составляет 0,03/0,01 мг/м<sup>3</sup> [2].



В странах Европейского Союза (ЕС) уже действуют или принимаются новые Европейские экологические директивы. Кратко рассмотрим директивы, которые касаются ограничения вредных веществ:

1. Директива ЕС №2000/53/ЕС: *«Конец жизни транспортных средств»* (*«EndofLifeVehicle»*) направлена на ограничение использования четырех металлов: кадмия, свинца, ртути, шестивалентного хрома в машинах. Согласно Директиве ЕС №2000/53/ЕС допускается использование шестивалентного хрома только для защиты от коррозии и ограничивается его общее содержание на поверхности деталей – не более 2 г/автомобиль, для всех других целей использование шестивалентного хрома не допускается.

2. Директива 2002/95/ЕС: *«Ограничение вредных веществ»*. (*«Restriction of Hazardous Substance»*) направлена на ограничение вредных веществ в электрических и электронных устройствах. К ним отнесены: кадмий, ртуть, свинец, шестивалентный хром, PBB (полибромированные дифенилы), PBDE (эфир полибромированного дифенила). Согласно данной директиве, максимальная концентрация в совокупности ртути, свинца, шестивалентного хрома, PBB и PBDE в гомогенных материалах не должна превышать 0,1 масс. %. Учитывая сложный количественный учет соединений Cr(VI) на большом числе деталей, входящих в автомобиль, радикальной мерой по исключению шестивалентного хрома стал его полный запрет для конверсионных покрытий с 01.07.2007, что и было предусмотрено решением ЕС №2002/525/.

Кратко проведён анализ свойств основных электролитов хромирования, применяемых в РФ.

Для промышленного хромирования наиболее широко применяют электролиты с концентрацией хромового ангидрида ( $\text{CrO}_3$ ) 250 г/л и небольшим количеством  $\text{H}_2\text{SO}_4$  (в соотношении  $\text{CrO}_3:\text{H}_2\text{SO}_4 = 100:1$ ). Такие электролиты получили название стандартных. Однако такой процесс является несовершенным по технологическим параметрам: на выделение металла расходуется всего 12–15 % электрической энергии, остальная часть – на побочные процессы (образование Cr(III) и выделение газообразного водорода). Скорость осаждения хрома мала, например, для получения износостойкого покрытия толщиной 100 мкм в «стандартном» электролите на постоянном токе продолжительность хромирования составляет в среднем 4–8 ч. Металл по поверхности изделия распределяется неравномерно. Существенным недостатком является также увеличение шероховатости по мере увеличения толщины покрытия. Поэтому, в силу указанных причин, многие детали подвергаются шлифованию, при котором снимается от 15 до 30 % толщины нанесённого слоя хрома.

Результаты проведенных экспериментов, а также опыт применения в промышленности позволяют сделать вывод: при хромировании в «стандартном» электролите при оптимальных режимах получения износостойких покрытий ( $i_k = 50...70 \text{ А/дм}^2$ ,  $t_{\text{эл-та}} = 50...55 \text{ }^\circ\text{C}$ ) вынос электролита, через вентиляцию составляет 200–220 мл с  $1 \text{ м}^2$  хромируемой поверхности. В процессе хромирования значительные потери  $\text{CrO}_3$  происходят вследствие уноса его с деталями и приспособлениями. Эти потери, в зависимости от толщины покрытия, могут составлять от 20 до 80 %. Пары хроматов, попадая в атмосферу, могут разноситься ветром на многие километры, нанося вред окружающей среде.

Из-за вступления в действие директив, ограничивающих применение шестивалентного хрома, сегодня наиболее остро встает проблема его замены. Было разработано большое количество вариантов для замены шестивалентного хрома, где основным направлением развития электроосаждения хромовых покрытий – использование состава

вов на основе трехвалентного хрома [3-5], и замена на сплавы или композиционные покрытия на основе хрома с набором свойств аналогичных хромовым покрытиям [7-12]. Проанализируем некоторые литературные источники последних годов.

В работе [3] рассмотрен механизм электроосаждения хрома из растворов метансульфонатов солей Cr(III). Влияние ПЭГ (полиэтиленгликоля) на процесс электроосаждения трехвалентного хрома показано в [4], а применение формальдегида в качестве лиганда для получения электролитического хрома из трехвалентных электролитов в [5]. Из большого числа публикаций, посвященных получению композитов на основе хрома, можно выделить покрытия на основе карбида хрома Cr-C из электролита на основе Cr(III), содержащему муравьиную кислоту [6]. Данный состав позволяет получать аморфную структуру, содержащую Cr, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и различные соединения Cr-C с содержанием углерода, равномерно распределенного по образцу. Далее можно отметить, композиты Cr-C/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, полученные электроосаждением из трехвалентных электролитов хромирования [7], содержащих суспендированные наночастицы Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>. Согласно данным работы [7] композит Cr-C-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> имеет лучшие механические характеристики, чем покрытие Cr-C. Частицы Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> могут значительно повысить твердость композитного покрытия, а сопротивление износу значительно улучшается за счет добавления частиц Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>.

В работе [8] исследована износостойкость и коррозионная стойкость покрытий на основе ниобия-хрома на AlSiD<sub>2</sub>, полученных из электролита на основе трехвалентного хрома, названный TCP. TCP – это растворы электролита на основе трехвалентного хрома, которые работают при комнатной температуре, и по экологическим нормативам удовлетворяют директивам ЕЭС. Согласно литературным данным, из этих растворов, по сравнению с другими «трехвалентными» хроматными электролитами, получают более твердые и плотные пленки покрытия, а по коррозионной стойкости - сопоставимые с пленками, содержащими шестивалентный хром. Однако применение данных составов на территории РФ проблематично, вследствие их ноу-хау.

В заключение краткого обзора работ российских исследователей необходимо отметить Cr-C-W сплав [9], полученный электроосаждением из водно-диметилформамидных растворов хлорида хрома (III), и, по технологии китайских исследователей, - методом искрового спекания [10].

Таким образом, можно отметить основную тенденцию - замена хрома (VI), в основном, на электролиты с применением активных комплексов Cr(III), содержащих органические лиганды, или композиционные покрытия на основе хрома, имеющие либо недоступный, либо сложный, в технологическом осуществлении, состав электролита. Поэтому поиск альтернативных покрытий продолжается.

В рассматриваемой статье предлагается композиты на основе никеля, легированные бором до 1,5 мас. % в качестве альтернативы хромовым покрытиям [11-13].

Наибольшее количество публикаций, связанных с разработкой составов, режимов электроосаждения и поиска борсодержащих восстановителей приходится на 1980-1995 годы, в данной статье пропустим обзор литературных данных по составам электролитов для получения композитов Ni-B и их свойствам для различных отраслей промышленности. Единственную особенность хотелось бы отметить. Из анализа литературных источников можно отметить тенденцию в дифференциальном подборе электролитов для получения покрытий Ni-B в зависимости от свойств, требуемых в различных областях промышленности. Учитывая избирательность свойств покрытий и требования экологии при их получении, будущее по дальнейшей разработке электролитов для нанесения покрытий принадлежит электрохимическому способу получения из более

простых по составу электролитов с использованием нетоксичных, устойчивых борсоединений. Наибольший интерес представляет сульфаматный электролит никелирования, так как, согласно литературным данным, полученные из него осадки характеризуются относительно меньшим содержанием водорода, большей пластичностью и меньшими внутренними напряжениями [14, 15].

Поэтому, для разработки электролита, обеспечивающего получение функционального композита Ni-B, обладающего оптимальной твердостью, износостойкостью, равномерным распределением по толщине для машиностроительного направления, в качестве базового выбран сульфаматный электролит никелирования. Приоритет по исследованию процесса электроосаждения сплава никель-бор из сульфаматных электролитов с добавкой декагидробората натрия принадлежит авторам работы [16].

Итак, в зависимости от применяемых составов, режимов электролиза, природы борсодержащего восстановителя можно получить различные по содержанию бора в образцах и, соответственно, - свойства композитов никель-бор. Данная система оказалась уникальной и гибкой по причинам:

1. Варьируя содержанием бора в композите, можно изменять функциональные свойства и использовать: в радиоэлектронной промышленности и приборостроении; машиностроении и энергетике.

2. Контроль всех компонентов в составе композита никель-бор и их корректировки.

3. Влияния бора, концентрации до 1 мас. % (в пересчете на атомарный бор 5 ат. %), на уменьшение содержания водорода в никелевых образцах [17, 18], что, в сравнении с чистым никелем, важно для получения хорошей адгезии и меньшей хрупкости.

4. В результате проведенных исследований, связанных с возможностью получения толстослойных образцов, получены образцы до 200 мкм [19], обладающие набором таких улучшенных свойств, как твердость, износостойкость, что открывает перспективы использования композитов никель-бор для восстановления изношенного слоя деталей, взамен электролитического хрома, в машиностроении различной ведомственной принадлежности. Исследований по данной проблеме недостаточно, поэтому работу в данном направлении необходимо продолжить.

Основная стратегия проведенной нами работы - продолжение исследования возможности применения гальванического композита Ni-B взамен электролитического хрома, используемого в машиностроительном оборудовании. В данной работе решались конкретные задачи: Сравнительный анализ наиболее важных характеристик покрытий хромом и композитом никель-бор на подложку Ст-3, одного из конструктивных материалов вала в двигателях внутреннего сгорания.

## 2. Методика эксперимента

В качестве основы под композит никель-бор использовали Ст-3, применяемые в машиностроительной промышленности, а также медь, железоникелевые сплавы 42НА.

Твердость по методу Виккерса определяли с помощью прибора ПМТ-3 (при нагрузке 100 гр.), толщина слоя 16 мкм по ГОСТ Р ИСО 6507-1-2007. Значение твердости по методу Виккерса вычисляли по формуле (ГПа, в единицах твердости):

$$Hv = 18,54 \cdot P/d^2, \quad (1)$$

где  $H_v$  – твердость по Виккерсу, ГПа;  $P$  – нормальная нагрузка, приложенная к алмазному наконечнику, гр.;  $d$  – значение длины диагонали отпечатка алмазной пирамиды, мкм; 18,54 – коэффициент определяется конструктивными особенностями прибора.

При толщине слоя более 16 мкм, применяли методику определения твердости по Роквеллу ( $H_{HRA}$ ) по ГОСТ 9013-59 (ИСО 6508-86). Нагрузка 250 гр.; Время нагружения (разгрузки) 2-8 с. Пределы измерения твердости по Роквеллу: шкала А ( $HRA$ ) 70...85 единиц (твердые сплавы, изделия с высокой поверхностной твердостью).

Адгезию определяли по ГОСТ 9.302–88. Внутренние напряжения определяли методом гибкого катода по ГОСТ 9.302-88 (приложение 10). Шероховатость измеряли на профилометре типа А 11 модель 283 при скорости движения датчика 0,25 мм/с и пределе измерения 0,1 мкм. Разность между средними значениями шероховатости покрытия и подложки определяли, как:

$$\Delta R_{a,cr} = R_{a,cr, \text{покрытие}} - R_{a,cr, \text{подложка}} \quad (2)$$

Статистическая обработка значений шероховатости полированной подложки до 14 класса Ст-3 дала величину  $R_{a,cr, \text{подложки}} = 0,036$  мкм.

Содержание водорода определялось методом вакуумной экстракции (содержание  $H_2$  на 100 г покрытия). При этом образец помещался в кварцевую камеру в которой создавался вакуум  $10^{-5}$  мм. рт. ст., затем нагревался до температуры  $500^\circ C$  и по разности давлений до и после нагрева вычислялся объем водорода по формуле:

$$V_{H_2} = 205 \cdot \Delta P / m, \text{ см}^3 / 100 \text{ г} \quad (3)$$

где  $\Delta P$  - разность давлений, мм.рт.ст.;  $m$  - масса образца, г; коэффициент 205 определен конструктивной особенностью установки.

Кроющую способность электролита по металлу определяли в электролитической ячейке с плоским анодом и с катодом, согнутым под прямым углом. Поверхность катода, которая занята покрытием (в %), характеризует кроющую способность электролита по металлу.

Внутренние напряжения  $\sigma$ , МПа, определяли методом гибкого катода по ГОСТ 9.302-88 (ИСО 1463-82, ИСО 2064-80, ИСО 2106-82).

### 3. Сравнительный анализ свойств хромовых покрытий и композитов никель-бор

Определим возможности применения композитов Ni-B, как альтернативных покрытию Cr(VI), по следующим параметрам: экологические характеристики, технологические показатели и некоторые физико-механические свойства (на полноту сравнения характеристик автор в статье не претендует). В таблице 1 показаны сравнительные характеристики хромовых покрытий и никель-бор композитов.

В таблице 1 приведены характеристики хромовых покрытий, которые получены из разбавленного электролита хромирования с концентрацией хромового ангидрида ( $CrO_3$ – 100-150 г/л,  $H_2SO_4$ - 1,0-1,5 г/л) и содержащий органические компоненты (г/л): кристаллический фиолетовый (КФ) – 1,0-1,5 и полиметилен- $\beta$ -нафталинсульфонат натрия (ПМНС) -  $4 \cdot 10^{-4}$  -  $6 \cdot 10^{-3}$ [20].

Таблица 1 - Сравнительные характеристики хромовых покрытий и альтернативных композитов никель – бор

№ п/п	Наименование характеристики	Хромовые (блестящие) покрытия	Композит никель - бор
Качественные показатели технологии получения			
1.	Экологическая безопасность	ПДК в воздухе рабочей зоны в пересчете на Cr(VI) составляет 0,03/0,01 мг/м <sup>3</sup> .	ПДК в воздухе рабочей зоны в пересчете на Ni(II) в виде гидрозоля оставляет 0,005 мг/м <sup>3</sup> .
2.	Энергопотребление на единицу поверхности	Повышенное	Экономичное (в 100 раз ниже)
Количественные показатели технологии получения			
Технологические параметры:			
3.	Плотность катодного тока $i_k$ , А/дм <sup>2</sup>	60-70	2-3
	Температура электролита, °С	55-57	40-50
	pH	<2	3,5-4,5
	Выход по току, %	до 20 - 22	~96
4.	Скорость осаждения, мкм/мин	~0,2	при $i_k = 2$ А/дм <sup>2</sup> равна
5.	Продолжительность электролиза для получения толщины слоя 16 мкм, мин	80	40
6.	Максимальный разброс толщины (шероховатость), $\Delta Ra$ , ср, мкм	0,02	0,01
7.	Допустимая толщина покрытия без шлифования, мкм	4-22	до 500 без шлифования
8.	Кроющая способность на стали Ст-3, %	~90	100
Физико-механические свойства:			
9.	Микротвёрдость покрытия HV, ГПа (по Виккерсу)	7-10	6-8
	Содержание водорода в образце $V_{H_2}$ , см <sup>3</sup> /100г	550 - 650	~60-80
	Внутренние напряжения $\sigma$ , МПа	570 - 590	80- 150

Данный состав электролита позволяет повысить выход по току хрома в среднем до 20-22 % по сравнению со стандартным электролитом (CrO<sub>3</sub>- 250 г/л, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>- 2,5 г/л), выход по току хрома всего 12-15%, остальная часть энергии идет на побочные процессы (образование Cr(III) и выделение газообразного водорода). Анализ данных, приведенных в табл. 1, позволяет сделать вывод о том, что композит Ni-B по технологическим, экологическим, экономическим и физико-механическим параметрам не уступает Cr-покрытиям, но в ряде случаев и превосходит их.

Рассмотрим более подробно приведенные в табл. 1 показатели.

1. Экологические характеристики.

Электроосаждение покрытий Ni-B проводят в сульфатном электролите никелирования, компоненты которого не относятся к промышленным ядам, в отличие от основного компонента электролита хромирования CrO<sub>3</sub>, который согласно директиве ЕС №2000/53/ЕС направлена на ограничение использования четырех металлов: кадмия, свинца, ртути, в том числе и Cr(VI) в машиностроении.

Ориентировочный безопасный уровень воздействия (ОБУВ) борсодержащей добавки класса «полиэдрические бораты», согласно ТУ 6-02-1-513-86 составляет 2 мг/м<sup>3</sup> для воздуха рабочей зоны, что соответствует требованиям экологической безопасности технологических процессов получения композитов Ni-B.

При одинаковой толщине расход электроэнергии на единицу поверхности Ni-B – композита примерно в 100 раз меньше, чем при осаждении электролитического Cr, что свидетельствует об экономической целесообразности широкого применения покрытий композитом Ni-B.

2. Технологические параметры.

Сравнительный анализ режимов электроосаждения композитов Ni-B из сульфатного электролита никелирования и Cr из разбавленного электролита хромирования позволяет сделать вывод о том, что электроосаждение композитов Ni-B протекает в более «мягких» режимах электролиза, чем Cr. Процесс электроосаждения композитов Ni-B отличается от процесса нанесения хрома стабильностью в работе в менее кислых электролитах, при pH = 3,5–5,0, и меньшим температурным диапазоном и плотностями катодного тока, а соответственно большей технологичностью процесса и более низкой агрессивностью к гальваническому оборудованию.

Оптимальные режимы электролиза:  $i_k = 0,5-4 \text{ А/дм}^2$ ;  $t_{\text{эл-га}} = 30... 50 \text{ }^\circ\text{C}$ ; pH = 3,5... 5,0, выход по току композита Ni-B составляет 96-98 %. Достаточно высокая скорость осаждения, например, при  $i_k = 2 \text{ А/дм}^2$  равна 0,4 мкм/мин, продолжительность электролиза для получения необходимой толщины 16 мкм составляет 40 минут.

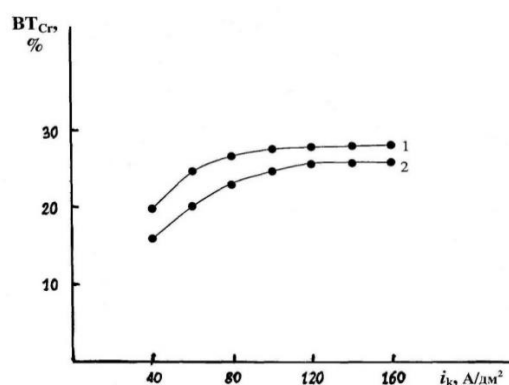


Рисунок 1, а. Зависимость выхода хрома по току от плотности катодного тока при  $\tau_{\text{эл-за}} = 5 \text{ мин}$ ,  $t_{\text{эл-га}} = 57 \text{ }^\circ\text{C}$ . 1 - импульсный режим с остаточным током 2 А; 2 - стационарный режим. Состав электролит (г/л): CrO<sub>3</sub> - 150; H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> - 1,5; КФ - 1,5; ПМНС -  $6 \cdot 10^{-3}$

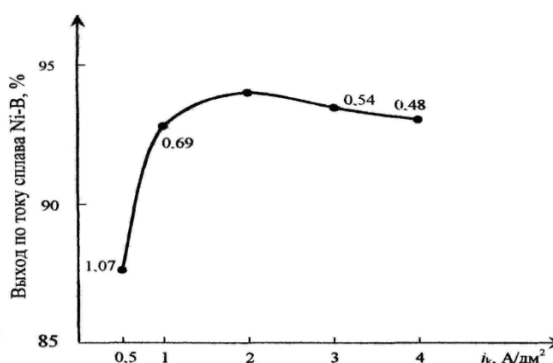


Рисунок 1, б. Зависимость выхода по току композита Ni-B от  $i_k$ . Режимы электролиза:  $\tau_{\text{эл-за}} = 20 \text{ мин.}$ ;  $C_{\text{добавки}} = 0,054 \text{ г/л}$ ; pH = 4,0;  $t_{\text{эл-га}} = 40 \text{ }^\circ\text{C}$ . Цифрами указано содержание бора в композите Ni-B в масс. %

Скорость осаждения из стандартного электролита хромирования  $v_{осад}$   $\sim 0,1$  мкм/мин, время электролиза для получения толщины, например, 16 мкм составляет 160 мин, а скорость из разбавленного электролита хромирования  $v_{осад}$   $\sim 0,2$  мкм/мин (увеличивается в  $\sim 2$  раза), время электролиза для получения толщины 16 мкм составляет 80 мин.

Для сравнения представлены зависимости выхода по току хрома [11] и композита Ni-B на рис. 1а, б. Анализ кривых (рис. 1 а, б) показывает, что зависимость выхода по току (ВТ) Cr имеет монотонно возрастающий характер, зависимость ВТ композита Ni-B неявно выраженный максимум, рисунок приведен для лучшей наглядности.

Сравнение кроющей способности электролитов никелирования и хромирования по металлу свидетельствует о преимуществе процесса никелирования. Кроющая способность электролита никелирования для получения композит никель-бор составляет 100 %. Для всех типов изучаемых подложек (сталь Ст-3, медь, железоникелевые сплавы 42НН). Графическое представление кроющей способности электролита никелирования по металлу дано на рис. 2а, для сравнения показано распределение покрытия хромом из разбавленного электролита хромировании состава (г/л): CrO<sub>3</sub> - 150; H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> - 1,5; КФ - 1,5; ПМНС -  $6 \cdot 10^{-3}$ , рис. 2б.

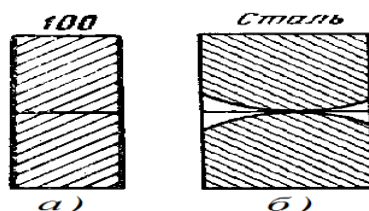


Рисунок 2. Графическое изображение кроющей способности электролитов никелирования для получения композита Ni-B (а) и разбавленного электролита хромирования (б)

Результаты по определению толщины покрытия композита показали, что максимальный разброс толщины композита Ni-B составляет не более 1,5 мкм (для толщины 16 мкм), а для хромовых покрытий разброс по толщине может составлять от 5 до 30 мкм [21], в данном конкретном электролите хромирования максимальный разброс толщины может составлять до 6-7 мкм.

Композиты Ni-B, по сравнению с Cr покрытиями, характеризуется мелкокристаллической структурой и более ровным рельефом поверхности (коэффициент выравнивания профиля поверхности композита Ni-B составляет 2,18). Коэффициент выравнивания профиля поверхности композита Ni-B рассчитывался по отношению к Ni:  $\Delta Ra, cpNi = 0,024$  мкм и  $\Delta Ra, cpNi+0,54 B = 0,011$  мкм:

$$K = \Delta Ra, cpNi / \Delta Ra, cpNi+0,54 B = 0,024 / 0,011 = 2,18.$$

Шероховатость покрытий композитами Ni-B с увеличением толщины от 2 до 16 мкм изменяется незначительно, в отличие от хромовых покрытий. Сравнительные характеристики шероховатости поверхности для Cr покрытий и композитов Ni-B в зависимости от плотности катодного тока представлены на рис. 3.

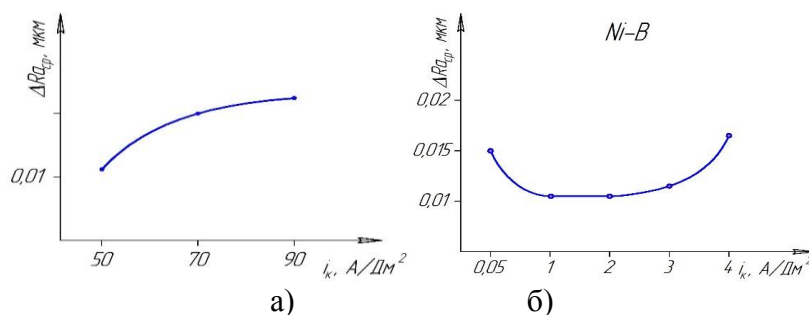


Рисунок 3. Влияние  $i_k$  на шероховатость: а - хромовых покрытий; б – композитов Ni-B. Толщина покрытий одинакова и составляет 16 мкм

Для хромовых покрытий наблюдается монотонное увеличение шероховатости поверхности с повышением  $i_k$  от 50 до 90 А/дм<sup>2</sup>. Для композитов Ni-B наблюдается неоднозначная зависимость: при переходе от Ni<sup>0</sup> к Ni-B<sup>0</sup> профиль поверхности сначала выравнивается, затем значение  $\Delta Ra_{sp}$  Ni-B практически не изменяется и при повышении  $i_k$  до 4 А/дм<sup>2</sup> шероховатость поверхности композитов Ni-B увеличивается.

В выбранном диапазоне  $i_k$  2-3 А/дм<sup>2</sup>  $\Delta Ra_{sp}$  Ni-B практически не изменяется и составляет  $\Delta Ra_{sp} Ni + 0,54 V = 0,011$  мкм.

Полученные результаты позволяют получить композиты Ni-B большой толщины, для наших целей - это толщина не более 16 мкм на подложке стали Ст-3 (можно получить ее до ~500 мкм). Это определяет область его применения – восстановление изношенных деталей машин и механизмов в машиностроительной области, а также возможность наносить композиты Ni-B на сложнопрофильные изделия, без дополнительной технологической операции шлифования, которая обычно применяется после осаждения толстослойных хромовых покрытий.

**Физико-механические свойства.**

По сравнению с Cr покрытия композитами Ni-B имеют меньшие внутренние напряжения в 4 раза, соответственно  $\sigma_{Cr} = 570-590$  МПа, а композита  $\sigma_{Ni-B} = 80-150$  МПа.

В рабочем диапазоне  $i_k = 2-3$  А/дм<sup>2</sup> микротвердость композитов Ni-B по Виккерсу составляет 6–8 ГПа (содержание бора – 0,5–1,0 мас. %), а для Cr покрытий 7-10 ГПа в диапазоне  $i_k = 50-90$  А/дм<sup>2</sup>. Значения микротвердости для двух покрытий сопоставимы.

Для определения необходимых функциональных свойств композитов Ni-B, таких как твердость и сохранения их при увеличении толщины, проведено измерение твердости по Роквеллу.

Таблица 2. – Твёрдость композита Ni-B (по Роквеллу) в зависимости от толщины покрытия. Режим электролиза: pH = 4,0; t = 40 °C;  $i_k = 2$  А/дм<sup>2</sup>. Содержание борсодержащей добавки в электролите – 0,05 г/л

Содержание бора в композите Ni-B, масс. %	Толщина слоя, мкм	Твёрдость, HRA
0,5	50,0	55,0
0,4	100,0	55,4
0,3	200,0	54,2

В табл. 2 показана зависимость твёрдости по Роквеллу ( $H_{HRA}$ ) композитов Ni-B от толщины слоя. Из таблицы 2 следует, что твёрдость композитов Ni-B при  $d \geq 50$  мкм не зависит от толщины при одинаковом содержании бора и имеет стабильное высокое



значение  $H_{HRA}$ . При отжиге на воздухе или вакууме до  $200\text{ }^{\circ}\text{C}$  происходит увеличение твёрдости до  $57 H_{HRA}$  и не наблюдается окисления композита.

Анализ данных по изучению твёрдости композитов Ni-B толщиной от 15-20 мкм до 200 мкм показывает, что оно сравнимо по твёрдости с Cr покрытием. Микротвёрдость хромовых покрытий (на стали Ст-2 толщиной 60 мкм), полученных из стандартного электролита при  $i_k = 30 - 60\text{ А/дм}^2$ ,  $t_{эл-та} = 55-57\text{ }^{\circ}\text{C}$ , составляет 7,19–9,25 ГПа [21].

По нашим данным, твердость по Роквеллу составляет 55 HRA при толщине слоя 50–200 мкм, что соответствует показателям, обеспечивающим работу восстановленного изделия.

Одной из важнейших характеристик покрытий, полученных методом электролиза, является их наводороживание, вызывающее водородную хрупкость в материалах, что особенно важно учесть при больших толщинах покрытия, эксплуатирующегося при определенных нагрузках в технологических процессах. Особо следует отметить наводороживание хромовых покрытий и Ni-B композитов. Содержание водорода в композите Ni-B, например, при  $i_k = 2\text{ А/дм}^2$ ;  $\text{pH} = 4,0$ ;  $t_{эл-та} = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$  составляет  $V_{H_2} = 60\text{ см}^3/100\text{ г}$ , а блестящего электролитического хрома  $V_{H_2} = 550 - 650\text{ см}^3/100\text{ г}$  [21]. Содержание водорода в композитах Ni-B - в 10 раз меньше, чем хромовых покрытий, что обуславливает меньшую водородную хрупкость Ni-B композитов. Соответственно, лучшие эксплуатационные характеристики (лучшая адгезия, меньшие внутренние напряжения, равномерность толщины, твердости).

Степень наводороживания композитов Ni-B с ростом содержания бора от 0,1 до 1 мас. % при толщине покрытия  $d = 16\text{ мкм}$  (рис. 4) возрастает от 43 до  $100\text{ см}^3/100\text{ г}$ . Исследования показывают, что выбранный диапазон концентраций бора до 1,5 мас. % (6-7 ат. %) обеспечивает получение функциональных материалов Ni-B с необходимым комплексом свойств для машиностроения.

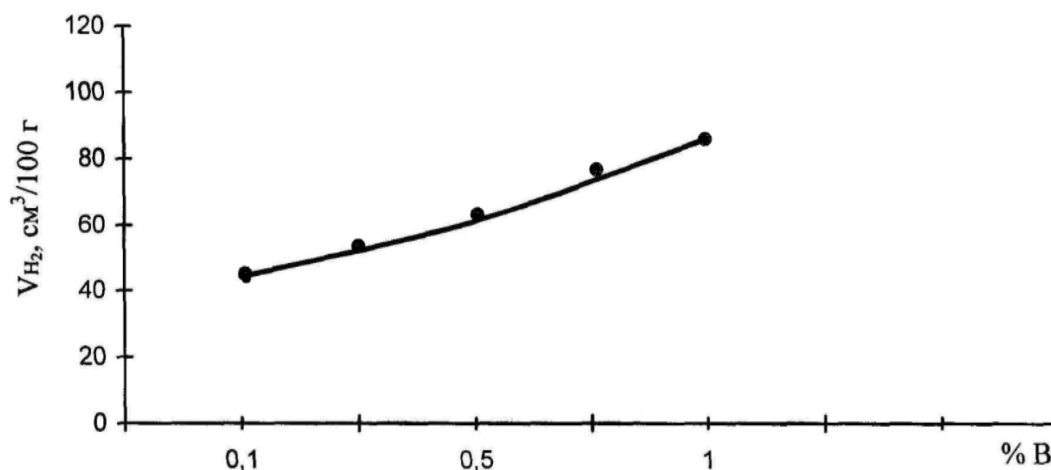


Рисунок 4. Зависимость наводороживания от содержания бора в композите Ni-B. Режим электроосаждения:  $\text{pH} = 4,0$ ;  $t_{эл-та} = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $i_k = 2\text{ А/дм}^2$ ;  $d = 16\text{ мкм}$

#### 4. Выводы:

1. Исследования показали, что композиты Ni-B не окисляются при термообработке в среде водорода и атмосфере воздуха при  $500\text{ }^{\circ}\text{C}$  в течение 60 минут, независимо

от толщины слоя от 4 мкм до 200 мкм (для различных технических приложений машиностроения).

2. Кроющая способность электролита никелирования для получения композита никель-бор составляет 100 %.

3. Результаты по определению толщины покрытия композита показали, что максимальный разброс толщины композита Ni-B составляет не более 1,5 мкм (для толщины 16 мкм).

4. Композиты Ni-B, по сравнению с Cr имеют в 4 раза меньшие внутренние напряжения,  $\sigma_{Cr} = 570-590$  МПа, композиты  $\sigma_{Ni-B} = 80-150$  МПа соответственно.

5. В рабочем диапазоне  $i_k = 2-3$  А/дм<sup>2</sup> микротвердость композитов Ni-B по Виккерсу составляет 6–8 ГПа (содержание бора – 0,5–1,0 мас. %), а для Cr покрытий – 7-10 ГПа в диапазоне  $i_k = 50-90$  А/дм<sup>2</sup>. Твердость по Роквеллу составляет 55 HRA при толщине слоя 50–200 мкм.

6. Содержание водорода в композите Ni-B, например, при  $i_k = 2$  А/дм<sup>2</sup>; pH = 4,0;  $t_{эл-та} = 40$  °C составляет  $V_{H_2} = 60$  см<sup>3</sup>/100 г,

*Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках проектной части государственного задания № 9.11295.2018/10.11 «Разработка технологий высокоизносостойких покрытий подшипников скольжения со сверхмалым коэффициентом трения на основе соединений Ni-B».*

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. H. R., Mott W. R. Electrolytic chromium // J. Phys. Chem., 1905. -V.9. - P. 231–256.
2. ГН 2.2.5.1313-03 Предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ в воздухе рабочей зоны. Гигиенические нормативы Минздрав России. – Москва, 2003.
3. Protsenko V. S., Kityk A. A., Danilov F. I. Kinetics and mechanism of chromium electrode position from methane sulphonate solutions of Cr (III) salts // Surf. Eng. Appl. Electrochem. 2014. V.50. P.384–389.
4. Phuong N. V., Kwon S. Ch., Lee J. Yu., Shin J., Huy B. Th., Lee Y. I. Mechanistic study on the effect of PEG molecules in a trivalent chromium electro deposition process // Microchem. J. 2011. V.99. P.7–14.
5. Kumar U. P., Kennady C. J. Characterization of Chromium Electrodeposits Obtained From Trivalent Electrolytes Containing Formaldehyde as Additive // Int J Thin Films Sci and Tech. 2015. V.4. P.147–153.
6. Lu C.E., Pu N.W., Hou K.H., Tseng C.C., Ger M.D. The effect of formic acid concentration on the conductivity and corrosion resistance of chromium carbide coatings electroplated with trivalent chromium // Applied Surface Science. 2013. V.282. P. 544–551.
7. Chia W. L., Hung B.L., Kung H.H., Shun Y.J., Chen E.L., Ming D.G. Characterization of the Cr-C/Si3N4 Composite Coatings Electroplated from a Trivalent Chromium Bath // ElectrochimActa. 2016. V.209. P. 244–253.
8. Castillejo F. E., Marulanda D.M., Olaya J.J., Alfonso J.E. Wear and corrosion resistance of niobium–chromium carbide coatings on AISI D2 produced through TRD // Surf Coat Technol. 2014. V.254. P.104–111.
9. Kuznetsov V. V., Pavlov L. N., Vinokurov E. G., Filatova E. A., Kudryavtsev V. N. Corrosion resistance of Cr-C-W alloys produced by electro deposition // J Solid State Electrochem. 2015. V.19. P.2545–2553.

10. Jiang Y., Yang J. F., Xie Z. M., Gao R., Fang Q. F. Corrosion resistance of W–Cr–C coatings fabricated by spark plasma sintering method // *Surf. Coat. Technol.* 2014. – V.254. – P.202–206.
11. Звягинцева, А. В. Проблемы хромирования и альтернативные покрытия Ni-B / А.В. Звягинцева, Р.И. Бурдыкина // *Гальванотехника и обработка поверхности.* – М., 2003 – Т.ХI. – №2. – С. 24-29.
12. Звягинцева, А. В. Физико-механические свойства никелевых покрытий, легированных бором / А. В. Звягинцева, А. И. Фаличева // *Гальванотехника и обработка поверхности.* – 1997. – Т.5. – № 2. – С. 24-31.
13. Звягинцева, А. В. Взаимосвязь структуры и свойств гальванических никелевых покрытий, легированных бором, в изделиях электронной техники / А. В. Звягинцева // *Гальванотехника и обработка поверхности.* – М.: Изд-во Российского химико-технологического ун-та им. Д.И. Менделеева, 2007. – Т. XV. – №1. – С.16-22.
14. Hammond R. A. F. Nickel plating from sulfamate solution / R.A.F. Hammond // *J. Metal Finishing* 1970 - V. 16 - Nr. 189. - P. 169 - 172.
15. Садаков, Г. А. Механизм образования сплавов никель-бор из кислых электролитов / Г. А. Садаков, А. Я. Езикян, Ф. И. Кукоз // *Электрохимия*, 1980. – Т.16. – № 12. – С. 1837-1940.
16. Звягинцева, А. В., Исследование процесса электроосаждения сплава никель-бор из сульфатных электролитов с добавкой декагидробората натрия / Звягинцева А. В., Фаличева А. И., Шалимов Ю. Н.; 1989. №11. –Деп. в ВИНТИ б/о 684-24.07.89, №4945- В89.
17. Zvyagintseva A.V. Boron - impurity trap in electrochemical nickel systems for the hydrogen atoms. *International Journal of Innovative and Information Manufacturing Technologies* 1 (2014) 55-62.
18. Zvyagintseva A. V. Hydrogen permeability of nanostructured materials based on nickel, synthesized by electrochemical method / *Proceedings of the 2017 IEEE 7th International Conference on Nanomaterials: Applications & Properties (NAP-2017).* – IEEE Catalog Number: CFP17F65-ART. - Part 2. - 02NTF41-1-02NTF41-5.
19. Богданович Е. Н., Технология восстановления системы сопряжения вал-подшипник / Е.Н. Богданович, А. В. Звягинцева, Ю. Н. Шалимов // *Технология машиностроения.* – М.: Изд-во: ООО «Издательский центр «Технология машиностроения»», 2010. – № 4. – С. 32-38.
20. Пат. 2094540 Россия, МПК: С25Д003/10. Электролит хромирования / Фаличева А. И., Бурдыкина Р. И., Чернышева В. Н.; патентообладатель ВПИ; заявл. 13.07.93; опубл. 27.10.1997.
21. Новый справочник химика и технолога. Электродные процессы. Химическая кинетика и диффузия. Коллоидная химия [Электронный ресурс]: электронная версия 2.1 / под общ. ред. И. П. Калинкина. - М.: НПО «Профессионал»: НПО «Мир и Семья», 2007. – 1электрон. опт. диск (CD-ROM). 200 Мб. ОЭЛБ-1.

Поступила в редколлегию 12.05.2020 г.

**Е. А. Митюшов**, проф, д-р ф.-м. наук, **Н. Е. Мисюра**, канд. ф.-м. наук  
Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина,  
г. Екатеринбург, Россия  
Тел./Факс: +7 (912) 241-0036; E-mail: mityushov-e@mail.ru, n\_misura@mail.ru

## КВАТЕРНИОННЫЕ МОДЕЛИ В КИНЕМАТИКЕ И ДИНАМИКЕ СФЕРИЧЕСКОГО ДВИЖЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

*В статье рассматриваются различные способы параметризации сферического движения твердого тела. На примере универсального шарнира демонстрируется использование самолетных углов и кватернионов при описании кинематики элементов сложных технических систем. С использованием предложенного формализма получены аналитическое выражение в виде основного уравнения кинематики универсального шарнира, связывающее угловые параметры положения крестовины с углом между осями пересекающихся валов. Путем решения обратной задачи динамики найдены координаты вектора вращающего момента, приложенного к крестовине универсального шарнира.*

**Ключевые слова:** кватернионы, шарнир Кардана-Гука, сферическое движение, динамика твердого тела.

**Е. А. Mityushov, N. E. Misyura**

## QUATERNION MODELS IN KINEMATICS AND DYNAMICS OF SPHERICAL MOTION OF ELEMENTS OF COMPLEX TECHNICAL SYSTEMS

*The article deals with various methods of parametrization of spherical motion of a solid body. The example of a universal joint demonstrates the use of airplane angles and quaternions in describing the kinematics of elements of complex technical systems. Using the proposed formalism, an analytical expression is obtained in the form of the basic kinematics equation of the universal joint, which connects the angular parameters of the crosspiece position with the angle between the axes of intersecting shafts. By solving the inverse problem of dynamics, the coordinates of the torque vector applied to the crosspiece of the universal joint are found.*

**Keywords:** quaternions, Cardan-Hooke joint, spherical motion, dynamics of a solid body.

### 1. Введение

Традиционно для систем со сферическими кинематическими парами, допускающими три независимых вращения звеньев относительно друг друга, используется параметризация движения с помощью углов Эйлера. Для представления кинематических уравнений такая параметризация приводит к громоздким тригонометрическим выражениям и вырождению кинематических уравнений при некоторых значениях параметров (gimbal lock). Трудности в исследовании динамики движения таких механических систем связаны с необходимостью интегрирования дифференциальных уравнений движения при наличии неголономных связей и необходимостью выбора параметризации их положения в пространстве, исключающее возникновение особенностей. В данной работе предлагается кватернионная модель, которая позволяет обойтись без использования тригонометрических функций, а кинематические уравнения записать в виде линейных дифференциальных уравнений, исключающих недостатки, связанные с применением углов Эйлера.

При кватернионном описании сферического движения твердого тела для задания его ориентации используются четырехмерные единичные векторы. При этом первая координата определяет угол поворота связанной с телом системы координат вокруг оси конечного поворота, а следующие координаты определяют положение этой оси. Возможность отыскания кватернионных функций при решении конкретных задач управле-

© Митюшов Е.А., Мисюра Н.Е.; 2020

ния движение позволяет получать эффективные алгоритмы управления движения различных механических систем.

Целью работы является обзор методов параметризации сферического движения твердого тела и иллюстрация кватернионного описания этого движения на примере кинематики и динамики универсального шарнира. Универсальный шарнир (шарнир Кардана – Гука) это основной узел карданной передачи – механизма, передающего крутящий момент у валов с пересекающимися осями [2,3]. Карданные передачи находят широкое применение в автомобилестроении, при изготовлении сельскохозяйственных и дорожных машин, в механическом оборудовании металлургических производств.

## 2. Способы параметризации сферического движения

Положение твердого тела определяется параметрами, которые являются функциями времени, а уравнения, которые связывают эти переменные величины со временем, называются уравнениями движения.

Положение тела с одной неподвижной точкой задается тремя параметрами. Положение связанной с телом системы координат относительно поступательно движущейся системы координат можно задать углами Эйлера. Параметрами, определяющими положение твердого тела, в этом случае, являются: угол прецессии, угол нутации, угол собственного вращения. Помимо углов Эйлера для параметризации сферического движения твердого тела используются также самолетные (корабельные) углы, направляющие косинусы, кватернионы и параметры ось-угол.

### Самолетные углы

Для задания ориентации летательных аппаратов используются самолетные углы:  $\vartheta$  - угол тангажа,  $\psi$  - угол курса,  $\gamma$  - угол крена. При этом, ось  $Ox_2$  опорной системы координат с началом в центре масс летательного аппарата направлена по местной вертикали, а ось  $Ox_1$  в горизонтальной плоскости по курсу. Угол тангажа  $\vartheta$  определяет поворот тела вокруг оси  $Ox_3$  опорной системы против хода часовой стрелки от оси  $Ox_1$  к оси  $Ox_2$ . В результате этого поворота получается система координат  $Ox'_1x'_2x'_3$ . Угол рыскания  $\psi$  задает поворот вокруг оси  $Ox'_2$  от оси  $Ox_3$  к оси  $Ox'_1$ . Получаем систему координат  $Ox_1x'_2x'_3$ . Угол крена  $\gamma$  определяет поворот вокруг оси  $Ox_1$  от оси  $Ox'_2$  к оси  $Ox'_3$ . После последовательного выполнения этих поворотов получается связанная с самолетом система координат  $Ox_1x_2x_3$  (рис.1).

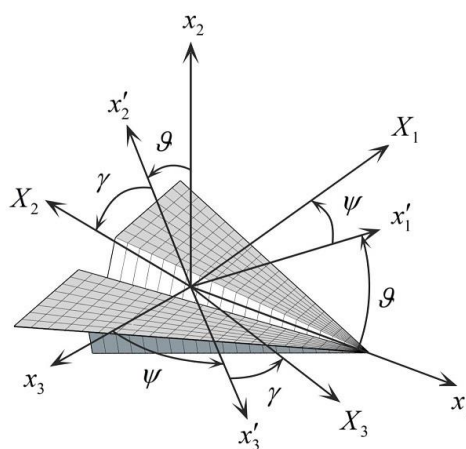


Рисунок 1. Последовательность поворотов  $\vartheta \rightarrow \psi \rightarrow \gamma$ .

*Матрица направляющих косинусов*

Взаимное расположение подвижной и неподвижной систем координат при сферическом движении твердого тела может задано с помощью, так называемой, матрицы направляющих косинусов

$$Q = \begin{pmatrix} Q_{11} & Q_{12} & Q_{13} \\ Q_{21} & Q_{22} & Q_{23} \\ Q_{31} & Q_{32} & Q_{33} \end{pmatrix}$$

Элементами этой матрицы являются косинусы углов между осями подвижной и неподвижной систем координат

$$Q_{ij} = \vec{e}'_i \cdot \vec{e}_j = \cos(Ox'_i, Ox_j) \quad i, j = 1, 2, 3.$$

(при матричном описании движения применяется нумерация осей координат)

С учетом шести условий ортогональности

$$\sum_{n=1}^3 Q_{in} Q_{jn} = \delta_{ij}, \quad \delta_{ij} = \begin{cases} 1, & i = j; \\ 0, & i \neq j \end{cases}$$

для направляющих косинусов независимых ее элементов только три.

Определитель матрицы направляющих косинусов равен единице. Совокупность всех матриц направляющих косинусов образуют группу по умножению SO (3) (специальная ортогональная группа матриц третьего порядка - группа вращений).

Группа вращений (группа поворотов) это набор всех вращений вокруг начала координат в трехмерном евклидовом пространстве. Вращение вокруг начала координат является линейным ортогональным преобразованием, которое в операторном виде записывается равенством

$$\vec{x}' = R \vec{x}, \tag{1}$$

где  $R$  - оператор поворота.

В матричном виде преобразование (1) записывается равенством

$$\begin{pmatrix} x'_1 \\ x'_2 \\ x'_3 \end{pmatrix} = R \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix}, \quad R = \|R_{ij}\| = \begin{pmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} \end{pmatrix}$$

Это преобразование позволяет найти положение точки твердого тела в системе координат, заданной неподвижным базисом  $\vec{e}_1, \vec{e}_2, \vec{e}_3$  после его поворота. Матрица  $R = \|R_{ij}\|$  называется матрицей поворота.

Примером получения матрицы поворота может служить ее запись через углы Эйлера путем последовательного осуществления поворотов на угол прецессии  $\psi$  вокруг оси  $Ox_3$ , далее на угол нутации  $\vartheta$  вокруг оси  $Ox_1$  в ее новом положении, и далее вокруг оси  $Ox_3$  в ее новом положении

$$R = \begin{pmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \vartheta & -\sin \vartheta \\ 0 & \sin \vartheta & \cos \vartheta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi & 0 \\ \sin \varphi & \cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Откуда

$$R = \begin{pmatrix} \cos \varphi \cos \psi - \cos \vartheta \sin \psi \sin \varphi & -\sin \varphi \cos \psi - \cos \vartheta \sin \psi \cos \varphi & \sin \vartheta \sin \psi \\ \cos \varphi \sin \psi + \cos \vartheta \cos \psi \sin \varphi & -\sin \varphi \sin \psi + \cos \vartheta \cos \psi \cos \varphi & -\sin \vartheta \cos \psi \\ \sin \varphi \sin \vartheta & \cos \varphi \sin \vartheta & \cos \vartheta \end{pmatrix}.$$

### Кватернионы

Как известно алгебра (от арабского *الْجَبْر*, «аль-джабр» — *восполнение*) — раздел [математики](#), посвящённый изучению операций над элементами множества произвольной природы, обобщающий обычные операции сложения и умножения чисел. В алгебре кватернионов соответствующими элементами (кватернионами) являются четырехмерные векторы  $q = [q_0, q_1, q_2, q_3]$ , которые записываются в следующем виде:

$$q = q_0 + q_1 i_1 + q_2 i_2 + q_3 i_3,$$

где  $q_0, q_1, q_2, q_3$  - координаты кватерниона, являющиеся вещественными числами;  $i_1, i_2, i_3$  - новые числа, которые являются аналогами мнимой единицы в теории комплексных чисел.

Для записи кватернионов удобно использовать геометрическую интерпретацию. При этом мнимые числа  $i_1, i_2, i_3$  отождествляются с единичными векторами ортогонального базиса  $\vec{i}_1, \vec{i}_2, \vec{i}_3$  трехмерного пространства. Кватернион  $q$  в этом случае рассматривается в виде суммы скалярной и векторной части

$$q = q_0 + \vec{q}, \quad \vec{q} = q_1 \vec{i}_1 + q_2 \vec{i}_2 + q_3 \vec{i}_3.$$

По аналогии с комплексными числами вводится сопряженный кватернион

$$\vec{q} = q_0 - q_1 i_1 - q_2 i_2 - q_3 i_3.$$

Кватернион называется единичным, если выполняется равенство

$$q_0^2 + q_1^2 + q_2^2 + q_3^2 = 1.$$

Группа единичных кватернионов  $Sp(1)$  двулистным образом покрывает группу вращений  $SO(3)$ , так как элементам  $[q_0, q_1, q_2, q_3]$  и  $[-q_0, -q_1, -q_2, -q_3]$  соответствует один элемент группы  $SO(3)$ . Известно, что матрица направляющих косинусов через координаты кватерниона выражается равенством [1]

$$Q = \|Q_{ij}\| = \begin{pmatrix} q_0^2 + q_1^2 - q_2^2 - q_3^2 & 2(q_0 q_3 + q_1 q_2) & 2(q_1 q_3 - q_0 q_2) \\ 2(q_1 q_2 - q_0 q_3) & q_0^2 - q_1^2 + q_2^2 - q_3^2 & 2(q_0 q_1 + q_2 q_3) \\ 2(q_0 q_2 + q_1 q_3) & 2(q_2 q_3 - q_0 q_1) & q_0^2 - q_1^2 - q_2^2 + q_3^2 \end{pmatrix}$$

Таким образом, сферическое движение твердого тела можно моделировать движением точки по гиперсфере:

$$q_0^2 + q_1^2 + q_2^2 + q_3^2 = 1.$$

При этом движению точки по дуге большого круга отвечает поворот тела вокруг фиксированной оси. Это отражает содержание теоремы Эйлера- Даламбера о конечном повороте - *любое перемещение твёрдого тела, имеющего одну неподвижную точку, можно осуществить одним конечным поворотом вокруг оси, проходящей через эту точку.*

### 3. Кинематика универсального шарнира

Универсальный шарнир состоит из двух вилок, жестко соединенных с валами, и крестовины (рис. 2).

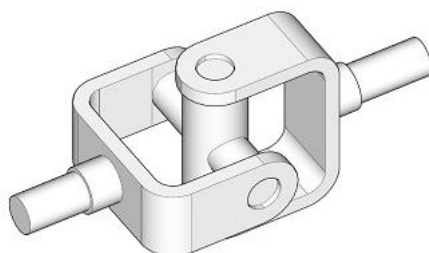


Рисунок 2. Универсальный шарнир (шарнир Кардана – Гука)

Первые теоретические работы, посвященные кинематике универсального шарнира, выполнены Робертом Уиллисом [3] в 1841 году и Жан-Виктором Понселе [4] в 1845 году и были посвящены установлению связи кинематических характеристик ведущего и ведомого вала. Отдельно движение крестовины универсального шарнира практически не рассматривалось, за исключением работы [6], где с использованием тензора поворота было получено разложение вектора угловой скорости крестовины по осям неподвижного базиса. Крестовина универсального шарнира совершает достаточно сложное сферическое движение, но оно легко может быть описано с помощью единичных кватернионов. Преимуществом их использования при описании сферического движения твердого тела является отсутствие вырождения кинематических уравнений при некоторых положениях тела и линейность этих уравнений [1].

Основной результат кинематики универсального шарнира относится к установленной в работе [7] связи между угловой скоростью ведомого вала  $\omega_{II}$  и угловой скоростью ведущего вала  $\omega_I$ , задаваемой соотношением

$$\omega_{II} = \frac{\cos \alpha}{1 - \sin^2 \alpha \sin^2 \phi_I} \omega_I, \quad (2)$$

где  $\alpha$  - угол между осями валов,  $\phi_I$  - угол поворота ведущего вала.

Этот результат был найден путем дифференцирования по времени следующего равенства, полученного геометрическим методом:

$$\operatorname{tg} \phi_{II} = \operatorname{tg} \phi_I \cos \alpha, \quad (3)$$

где  $\phi_{II}$  - угол поворота ведомого вала.

Формула (2) получена в предположении, что в начальном положении вилка ведущего расположена перпендикулярна плоскости осей пересекающихся валов. Если



вилка ведущего вала расположена в этой плоскости, то связь между угловыми скоростями задается соотношением [6]

$$\omega_{II} = \frac{\cos \alpha}{1 - \sin^2 \alpha \cos^2 \varphi_I} \omega_I$$

На рисунке 2 представлена кинематическая схема универсального шарнира, красная вилка связана с ведущим валом, а зеленая с ведомым. Для задания ориентации крестовины универсального шарнира воспользуемся самолетными углами:  $\vartheta$  - угол тангажа,  $\psi$  - угол курса,  $\gamma$  - угол крена (рис. 2).

Ось  $Ox_2$  опорной системы координат с началом в центре крестовины направлена вертикально. Ось  $Ox_1$  в горизонтальной плоскости вилки ведущего вала (рис. 2). Угол тангажа  $\vartheta$  определяется поворотом ведущего вала вокруг оси  $Ox_3$  опорной системы против хода часовой стрелки от оси  $Ox_1$  к оси  $Ox_2$ . В результате этого поворота получается система координат  $Ox'_1, x'_2, x'_3$ . Угол курса  $\psi$  в данной задаче равен нулю. Угол крена  $\gamma$  определяет поворот крестовины вокруг оси  $Ox'_1$  от оси  $Ox'_2$  к оси  $Ox'_3$ . После последовательного выполнения этих поворотов получается связанная с крестовиной система координат  $Ox''_1, x''_2, x''_3$ .

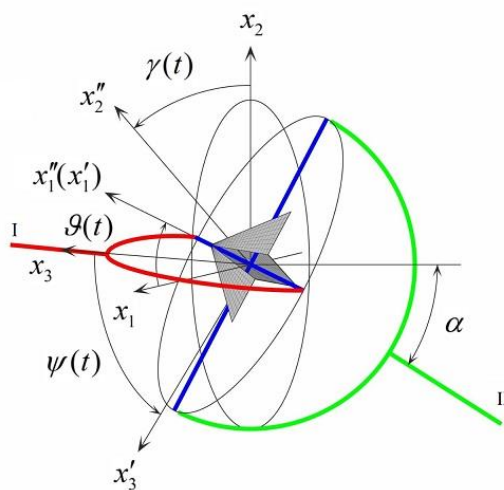


Рисунок 3. Задание ориентации крестовины с помощью самолетных углов и кадры анимации.

Полное исследование кинематики универсального шарнира дается следующими теоремами, которые приводятся без доказательства:

**Теорема 1. (Основное уравнение кинематики универсального шарнира)** Для углов  $\vartheta$ ,  $\gamma$  и  $\alpha$ , определяющих положение крестовины универсального шарнира (рис. 3), в любой момент времени выполняется равенство

$$\operatorname{tg} \alpha \operatorname{tg} \gamma \cos \vartheta = 1.$$

**Следствие.**

При движении крестовины угол крена  $\gamma$  меняется по закону:

$$\gamma(t) = \frac{\pi}{2} - \arctg(\operatorname{tg} \alpha \cos \vartheta(t)), \quad (4)$$

**Теорема 2.** Для углов  $\varphi_I$ ,  $\varphi_{II}$  и  $\alpha$ , определяющих положения ведущего и ведомого валов универсального шарнира, в любой момент времени выполняется равенство (2)

Полученные в теоремах 1 и 2 кинематические уравнения используем для описания сферического движения крестовины. Воспользуемся кватернионной моделью, согласно которой координаты единичного кватерниона ориентации  $q = [q_0, q_1, q_2, q_3]$ ,  $q_0^2 + q_1^2 + q_2^2 + q_3^2 = 1$  связаны с самолетными углами следующими соотношениями [8]:

$$\begin{aligned} q_0 &= \cos \frac{\vartheta}{2} \cos \frac{\psi}{2} \cos \frac{\gamma}{2} + \sin \frac{\vartheta}{2} \sin \frac{\psi}{2} \sin \frac{\gamma}{2}, \\ q_1 &= \cos \frac{\vartheta}{2} \cos \frac{\psi}{2} \sin \frac{\gamma}{2} - \sin \frac{\vartheta}{2} \sin \frac{\psi}{2} \cos \frac{\gamma}{2}, \\ q_2 &= \cos \frac{\vartheta}{2} \sin \frac{\psi}{2} \cos \frac{\gamma}{2} + \sin \frac{\vartheta}{2} \cos \frac{\psi}{2} \sin \frac{\gamma}{2}, \\ q_3 &= \sin \frac{\vartheta}{2} \cos \frac{\psi}{2} \cos \frac{\gamma}{2} - \cos \frac{\vartheta}{2} \sin \frac{\psi}{2} \sin \frac{\gamma}{2}. \end{aligned}$$

**Теорема 3.** Координаты вектора угловой скорости в подвижной системе координат связаны равенством

$$\dot{\Omega}_3 + \Omega_1 \Omega_2 = 0, \quad \dot{\Omega}_2 - \Omega_3 \Omega_1 = 0, \quad (6)$$

**4. Динамика универсального шарнира**

При известной угловой скорости ведущего вала и инерционных характеристиках крестовины проекции главного момента сил, действующих на крестовину, определяются из решения обратной задачи с помощью динамических уравнений Эйлера. При известных главных моментах инерции крестовины  $I_1, I_2$  и  $I_3$ , координаты вектора вращающего момента действующего на крестовину, определяются равенствами:

$$\begin{aligned} M_1 &= I_1 \dot{\Omega}_1 + \Omega_2 \Omega_3 (I_3 - I_2), \\ M_2 &= I_2 \dot{\Omega}_2 + \Omega_3 \Omega_1 (I_1 - I_3), \\ M_3 &= I_3 \dot{\Omega}_3 + \Omega_1 \Omega_2 (I_2 - I_1). \end{aligned}$$

С учетом выполнения кинематических соотношений (6) доказывается теорема:

**Теорема 4.** Динамические уравнения крестовины имеют вид:

$$\begin{aligned} M_1 &= I_1 \dot{\Omega}_1 + \Omega_2 \Omega_3 (I_3 - I_2), \\ M_2 &= [I_2 + (I_1 - I_3)] \dot{\Omega}_2, \\ M_3 &= [I_3 - (I_2 - I_1)] \dot{\Omega}_3. \end{aligned}$$

### 5. Заключение

В работе с использованием связи самолетных углов и кватернионной параметризации при описании движения универсального шарнира, включая сферическое движение крестовины, получены:

1. Кинематические характеристики ее движения.
2. Основное уравнение кинематики движения крестовины универсального шарнира в виде аналитического выражения, связывающего угловые параметры положения крестовины с углом между осями пересекающихся валов.
3. Аналитические выражения, позволяющие исследовать динамику универсального шарнира за счет изменения их инерционных характеристик.

Полученные результаты могут быть использованы для создания оптимальных конструкций универсальных шарниров за счет изменения их геометрии.

### ЛИТЕРАТУРА:

1. Борисов А. В., Мамаев И.С. Динамика твердого тела. / А. В. Борисов, И. С. Мамаев // НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика». – Ижевск, 2001. – 384с.
2. Cardanus H. De – Norimberga: Johannes Petreius, 1550.
3. Robert Hooke, A Description of Helioscopes, and Some Other Instruments (London, England: John Martyn, 1676), 32.p. [электронный ресурс] – URL: <https://books.google.ru/books?id=KQtPAAAACAAJ&pg=PP5&re> – (10.06.2020)
4. Willis, Robert. Principles of Mechanisms, (London, England: John W. Parker, 1841), pp. 272-284. [электронный ресурс] – URL: [https://books.google.ru/books?id=1CCEKSqQaqcC&pg=PA272&redir\\_esc=y#v=onepage&q&f=false](https://books.google.ru/books?id=1CCEKSqQaqcC&pg=PA272&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false) – (11.06.2020)
5. J. V. Poncelet, Traité de mécanique appliquée aux machines, Part 1 (Liège, France: Librairie scientifique et industrielle, 1845), pp. 121-124. [электронный ресурс] – URL: [https://books.google.ru/books?id=QqwAAAAYAAJ&pg=PA121&redir\\_esc=y#v=onepage&q&f=false](https://books.google.ru/books?id=QqwAAAAYAAJ&pg=PA121&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false) – (11.06.2020)
6. Жилин, П. А Динамика твердого тела / П.А. Жилин – Санкт-Петербург: Изд-во Политехнического ун-та, 2015. – 639 с.
7. Теория механизмов и механика машин: учеб. для вузов / [К. В. Фролов и др.] ; под ред. Г. А. Тимофеева. – Изд. 6-е, исправ. и доп. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2009. – 688 с.
8. Голубев, Ю. Ф. Алгебра кватернионов в кинематике твердого тела. / Ю.Ф. Голубев // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. – 2013. – № 39. – 23 с.

Поступила в редколлегию 14.05.2020 г.

УДК 621.83

**А. Н. Михайлов**, д-р тех. наук, проф., **В. Б. Котляров**, инженер,**С. Б. Котляров**, инженер

ГОУВПО «Донецкий национальный технический университет», г. Донецк, ДНР

Тел: +7(964) 7045362; E-mail: [validarkotlarov@mail.ru](mailto:validarkotlarov@mail.ru)

## СИНТЕЗ МОДЕЛИ ФУНКЦИОНАЛЬНО-ОРИЕНТИРОВАННОЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ СОЗДАНИЯ КПП БЕЗ РАЗРЫВА ПОТОКА ПЕРЕДАВАЕМОЙ МОЩНОСТИ

В статье приведены сведения о последовательности выполнения комплекса действий при создании нового изделия типа «Коробки переключения передач» (КПП) без разрыва потока передаваемой мощности. Указаны этапы жизненного цикла КПП от возникновения идеи до утилизации, освещены факторы, определяющие переход на каждый последующий этап проектирования с учетом итеративных и рекуррентных подходов достижения положительных результатов на каждом этапе. При этом указаны конструктивно-технологические признаки изделий, оказывающие влияние на выбор вариантов технологических воздействий при изготовлении.

**Ключевые слова:** этапы проектирования, жизненный цикл изделия, иерархические уровни, итеративный подход, технологическое воздействие, конструктивно-технологические признаки.

**A. N. Mikhaylov, S. B. Kotlyarov, V. B. Kotliarov**

### SYNTHESIS OF THE MODEL OF A FUNCTIONALLY-ORIENTED TECHNOLOGICAL SYSTEM OF CREATION OF A TRANSMISSION GEARBOX WITHOUT A BREAK OF POWER FLOW

The article provides information about the sequence of actions when creating a new product such as "Gearbox" (PPC) without breaking the flow of transmitted power. The stages of the PPC life cycle from the emergence of the idea to disposal are indicated, factors that determine the transition to each subsequent design stage are considered, taking into account iterative and recurrent approaches to achieve positive results at each stage. At the same time, the structural and technological features of the products are indicated that affect the choice of options for technological impacts during manufacture.

**Keywords:** design stages, product life cycle, hierarchical levels, iterative approach, technological impact, design and technological features.

#### 1. Введение

В данной работе предлагается рассмотреть укрупненно принципы создания новых технических средств в техносфере на примере разработки новой механической коробки переключения передач (КПП), обладающей новым качеством, в виде обеспечения передачи крутящего момента без разрыва потока передаваемой мощности, и функционально ориентированной технологии ее изготовления. Известно множество различных КПП [1], применяемых на различных видах техники, а также общие базовые принципы их создания [2, 3].

В настоящее время научная мысль продвинулась далеко вперед во многих областях техносферы, в том числе и в направлении создания новых видов техники и общих принципов создания технологии изготовления, обеспечивающей получение новых совокупностей качеств технических средств и меры полезности [4]. Создание же конкретных технических изделий требует конкретизации и параметризации общих принципов применительно к самой идее создания нового изделия при наличии запроса в обществе на такое изделие, к уровню квалификации создателя-разработчика, наличию технических средств и ресурсов, в том числе финансирования и времени.

Целью настоящей работы является подтверждение и расширение технологических возможностей общей концепции построения функционально ориентированных технологий в машиностроении [4] путем конкретизации для частного

случая создания КПП без разрыва потока передаваемой мощности.

Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие задачи:

1. Установить путь информационного потока технической идеи создаваемого механизма с выделением узловых моментов от возникновения замысла до реализации на физическом плане.

2. Установить и выделить основные информационные потоки, связывающие конструкторско-технологические аспекты задачи, и второстепенные, вспомогательные.

3. Обосновать возможность и необходимость установления в действующем производстве основных технологических переделов уже на стадии конструирования механизма и его деталей, а также широкой интерпретации и применения новых технологических возможностей на стадии изготовления.

## 2. Основное содержание и результаты работы

Рассмотрим применение указанных принципов на примере создания новой механической ступенчатой зубчатой КПП, обладающей новым пользовательским качеством: переключение передач при передаче крутящего момента на рабочие органы машины, без разрыва потока передаваемой мощности в процессе осуществления переключения.

Запрос на новое изделие обычно возникает в узком кругу специалистов, связанных с определенной задачей или решением определенной проблемы. Возникает запрос, как правило, в МЫСЛИТЕЛЬНОМ (ментальном) пространстве потенциального разработчика в образном выражении в процессе анализа работы машины или механизма, выдающего недостаточный результат для решения задачи. Этот недостаток может быть проявлен на физическом плане в маломощности механизма, недостаточной функциональности, в нестабильности работы, в проявлении иных показателей, не позволяющих решать поставленные задачи за счет применения механизма.

Запрос, как правило, не проявляется в семиотическом (С) пространстве, а находится в латентном состоянии в мыслительном (М) пространстве на протяжении какого-то периода до накопления достаточной информации для зарождения идеи по решению проявленного недостатка, в зависимости от множества самых разнообразных факторов. При накоплении достаточного информационно-энергетического потенциала и при определенной мотивации идея формируется в виде образа, который можно оформить в виде знакового отражения в семиотическом пространстве в словесном описании, в виде чертежей, прорисовок, заявок и т.д. С этого момента можно говорить о начале проявленной фазы создания нового изделия в реальном пространстве в виде семиотических знаков и подключению к процессу создания не только конструктивных ресурсов, но и ресурсов технологического обеспечения изготовления применительно к обозримому фонду ресурсов (знаниевых, кадровых, материальных, энергетических, информационных, управленческих и иных) разработчика. Но в мыслительном пространстве (М) потенциальным разработчиком к вынашиваемой идее могут быть привлечены очень ограниченные ресурсы, и очень ограниченное число потенциальных соисполнителей и потенциальных соразработчиков.

При переводе идеи из М-пространства в семиотическое пространство (С) существенно возрастает привлечение квалифицированных кадровых, энергетических и информационных ресурсов, вычислительной и иной вспомогательной техники, что можно выразить следующим образом:

$$\lim_{x \rightarrow 0} I_M(S_M \cap E_M \cap I_M) \rightarrow \lim_{x \rightarrow A} I_C(S_C \cap E_C \cap I_C) \quad (1)$$

где  $\lim I_M$  и  $\lim I_C$  – минимальные задействованные общие ресурсы для реализации идеи в мыслительном и семиотическом пространстве, расширяющие свои пределы при переходе в пространство (С), и включающие;

$R_M, R_C$  – материальные ресурсы на физическом плане, включая кадры и финансы при переходе идеи И в семиотическое (С) пространство;

$E_M$  и  $E_C$  – энергетические ресурсы (включая применяемые технические средства) для перевода идеи в знаки и изображения;

$I_M$  и  $I_C$  – информационные ресурсы и потоки, включаемые в процесс реализации проекта на стадии проработки в пространстве (С).

При этом общий ресурс, направленный на реализацию идеи от нулевого возрастает до некоторой величины А. Формируется выражение объема исходного входящего информационного  $I_V$  потока и объема ориентировочного выходного информационный потока  $I_W$  при неизвестном объеме вариантов проработки на каждой стадии процесса. На этой стадии в пространстве (С) идея уже перерождается в концепцию  $K_C$ , являющейся предтечей стадии проектирования, и можно записать:  $\lim_{x \rightarrow A} (R_C \cup E_C \cup I_C)$ .

При дальнейшем насыщении концепции ресурсами – материальными, энергетическими и информационными, концепция переходит в качественно новый статус – проект П, который может реализовываться поэтапно, многостадийно, и с итерационным и возможным рекуррентным подходом к решению задач на каждом иерархическом уровне проработки проекта. При этом собственно концепция может приобретать дополнительные качественные признаки под воздействием дополнительно полученной информации, и такие уточняющие воздействия с обратной связью могут проявляться на различных иерархических уровнях разработки проекта в семиотическом пространстве и вплоть до реализации технологии на физическом плане в материальном (твердотельном) исполнении, как отображено на рис. 1.

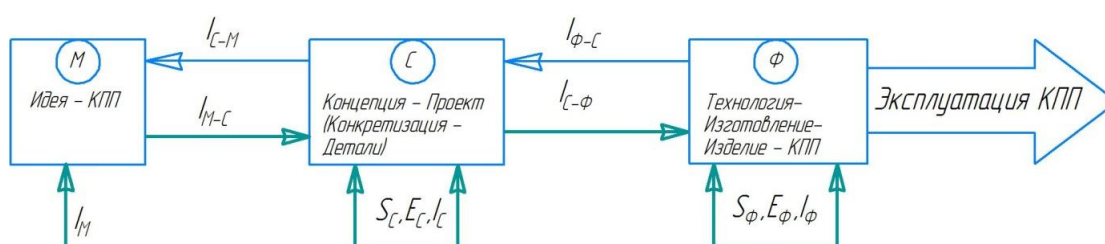


Рисунок 1. Порядок и схема разработки и создания КПП от идеи через проектирование до готового изделия и использования в сфере эксплуатации.

В первом блоке М на рис. 1 перерабатывается информация  $I_M$  из внешнего пространства, свидетельствующая о необходимости устранить недостаток, возникающих в работе технологических машин в определенной сфере из-за необходимости во время изменения оборотов выходного вала, при работе коробки передач с зубчатым зацеплением, прерывать поток передаваемой мощности. Возникает идея в процессе включения следующей передачи не выводить ведущую шестерню из полного зацепления с зубча-

тым колесом предыдущей передачи, что возможно сделать в передаче без изменения модуля и диаметра ведущей шестерни только за счет изменения диаметров ведомых колес и изменения межосевого расстояния. При этом в обязательном порядке необходимо обеспечить равенство окружных скоростей венцов колес в пространственной точке переключения передач.

Перенос идеи в семиотическое знаковое пространство  $S$  проявляется концепция КПП, заключающаяся в том, что необходимо выбрать из множества возможных механизмов изменения положения оси колеса в пространстве – геометрическое место точек оси вала ведомых колес (ГМТ) – кулачковых, эксцентриковых, кулисных и т.д., удовлетворяющих работоспособность КПП при выполнении определенных конструктивных ограничительных условий, и не создавая невыполнимых технологических требований.

Разработка ведется рекуррентным образом [4, 5, 6] с многократным повторением действий при использовании новых составляющих не только на уровне общей концепции КПП, но и с выделением основных функционально формируемых деталей.

Переборка вариантов и комбинаций вариантов известных решений не дала положительных результатов. ВОЗНИКАЕТ НОВОЕ ТЕХНИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ.

При этом информационные потоки между пространствами циркулируют в режиме обратной связи. На рис. 2 представлена схема проработки конкретных вопросов при решении конструкторско-технологических задач, в основании общей концепции построения функционально-ориентированных технологий в машиностроении [4, 6].

Иерархические уровни КПП определяются от общей сборочной единицы через узловые сборочные единицы к деталям по их функциональному назначению – основные детали, вспомогательные детали, нормализованные и стандартные. Как правило категория основных деталей включает в себя корпусные несущие и опорные детали, а также детали основного обеспечения целевой функции – в КПП это передача вращательного движения с изменением передаточного отношения между ведущим и ведомыми валами. Таковыми в данной КПП являются корпус, ведущая шестерня, блок-вал ведомых колес (который в общем случае может быть выполнен как монолитным цельнообработанным, так и сборочным), ведущий вал.

На более низком иерархическом уровне представлены детали вспомогательной категории, в которую входят направляющие детали, детали механизмов переключения и фиксации положения подвижных деталей, специально сконструированные крышки, детали для размещения подшипниковых узлов и др.

В категорию нормализованных деталей нижнего иерархического уровня входят различного вида фиксаторы, шпонки, штифты, ручки, планки, специальные прокладки и другие детали, выпускаемые специализированными предприятиями или своими производственными подразделениями в массовом или серийном порядке, которые можно заказать на стороне или приобрести на договорных основаниях.

Категория стандартных изделий, как правило, включает в себя все крепежные детали и чаще всего являются покупными деталями.

На этапе конструирования КПП конструктор не может не обращаться к технологическим аспектам проектирования по причине необходимости обеспечения принципиальной собираемости изделия, как в узловых сборках, так и относительно общей сборки изделия; необходимо учитывать физическую возможность механообработки деталей, возможности придать необходимые свойства поверхностям

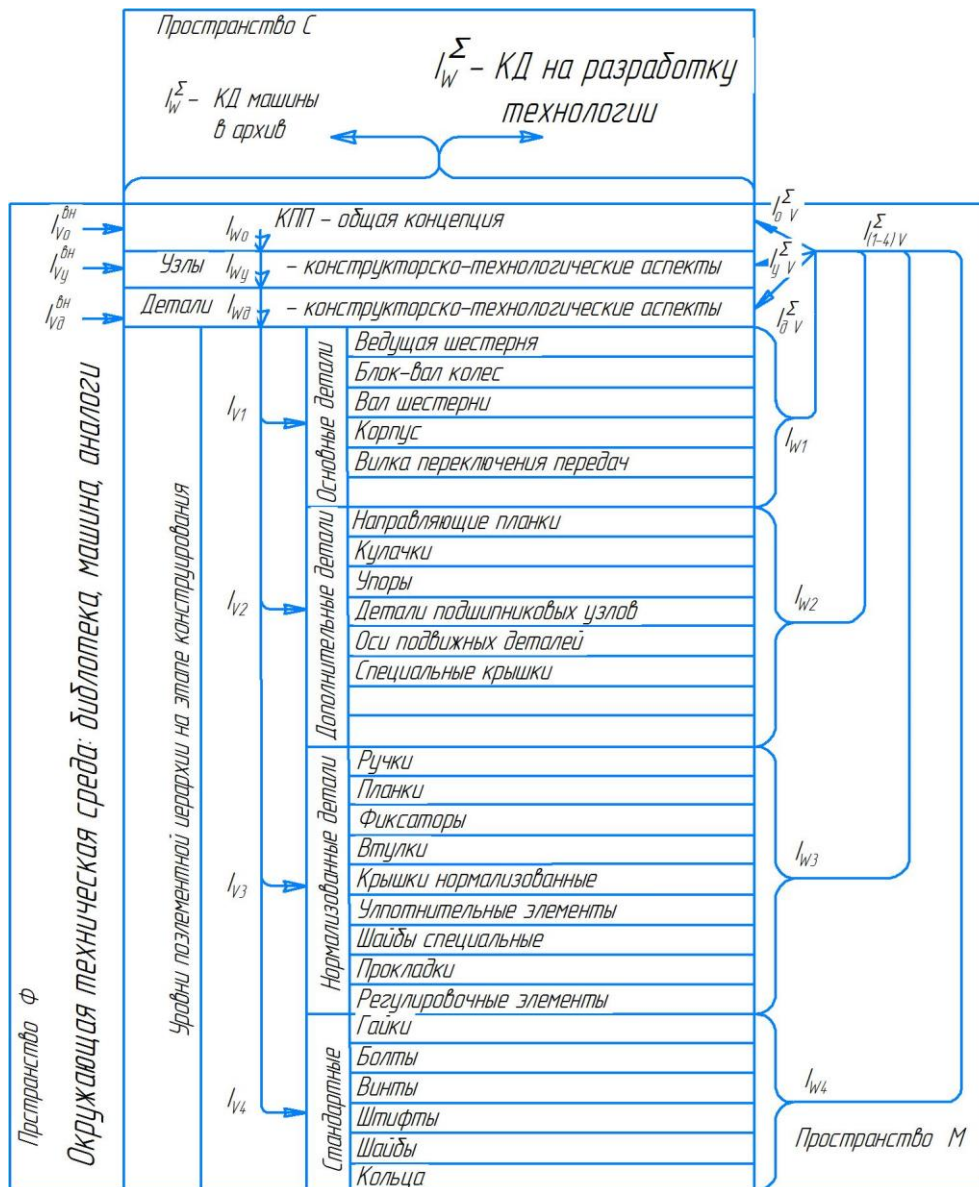


Рисунок 2. Принципиальная схема проектирования КПП на этапе создания конструкторской документации, учитывающей технологические аспекты имеющегося производства.

на действующем производстве. Например, на предприятии, для которого проектируется изделие к изготовлению, может отсутствовать определенный вид термообработки, может отсутствовать специальное зубообрабатывающее оборудование, и тогда, вместо монолитного блок-вала ведомых колес необходимо разрабатывать вариант сборочного узла блок-вала, и возможны иные аспекты производства.

Информационные выходные потоки  $I_W^K$  используемые при конструировании и отраженные в знаках пространства С, формируются как частные потоки информации в результате проработки по каждой детали и по каждому элементу детали из пространства М.



$$I_w^{K\Sigma} \in I_j^{C\bar{b}} \cap I_1^K \cap I_i^K \cap \dots \cap I_r^K, \quad (2)$$

где  $I_w^{C\bar{b}}$  - отражает информацию о сборочной единице  $j$ -го узла, включая способы сопряжения входящих в узел деталей, как оригинальных так и стандартных, покупных;

$I_w^K$  - отражает информацию о каждой детали из ряда от 1-ой до  $r$ -ой, включая размеры, допуски на размеры изготовления, шероховатость поверхностей.

Полная информация  $I_w^{K\Sigma}$  при конструировании изделия проявляется как конъюнкция частных потоков  $I_{wi}^K$  по каждой детали, по каждой угловой и общей сборке (2). По определенному множеству деталей возможны кольцевые проработки вопросов с учетом технологических аспектов обеспечения как геометрических форм и размеров деталей, так и обеспечения требуемых свойств поверхностей, модификаций и свойств подповерхностных слоев материала на заданных участках деталей.

Такие же рекуррентные подходы с возвращением к разработке отдельных элементов деталей, в зависимости от возможности технологических воздействий в будущем производстве, а также обеспеченности покупными изделиями. Такие кольцевые проработки применяются на всех иерархических уровнях с обеспечением итеративного подхода к достижению оптимального варианта конструкции, что позволяет существенно ускорить процессы подготовки производства и разрабатывать операционные процессы изготовления деталей, учитывая возможность применения автоматизированных способов разработки процессов [7, 8].

Кроме внутренних информационных потоков относительно узлов, деталей и общей конструкции при разработке КД разработчиками используется информация, поступающая из внешней среды, включающей библиотеку знаний, описание аналогов, информация о различных машинах, в которых применяются разного рода КПП, а также информация о технологической среде, предназначенной для изготовления изделия. Так символы  $I_{vo}^{6H}$ ,  $I_{vy}^{6H}$ ,  $I_{v\delta}^{6H}$  отражают входящие при конструировании объемы информации относительно общей сборки, узловой сборки и каждой детали соответственно. Полный объем КД передается в технологическое подразделение для разработки технологических процессов и в архив для хранения.

При передаче в технологические подразделения конструкторской документации (КД) на коробку начинается этап конкретизации технологии для маршрутной и операционной технологии изготовления КПП. На этапе разработки технологии на всех иерархических уровнях технологического проектирования осуществляется кольцевое с коррелятивной обратной связью решение принятия того или иного технологического воздействия при изготовлении деталей, а также осуществления контроля [10].

На рис. 3 представлена схема разработки технологии изготовления КПП на всех иерархических уровнях как продолжение общего проекта разработки изделия.

При этом информация о технологических воздействиях по обратной связи направляется в сферу конструктивных решений для возможной коррекции принятых конструктивных решений на всех иерархических уровнях – конструктивные элементы деталей, точность сопряжений, собираемость, точность изготовления и шероховатость поверхностей, модификации.

В сфере разработки технологии появляется поток информации из внешних источников о наличии оборудования, которое возможно применить при изготовлении,

о возможном инструментальном обеспечении, оснастке, станочном парке, возможности формообразования заготовок, обеспечения термообработки [11] по требованиям КД. Здесь же определяется материально-финансовое обеспечение производства, энергетическое обеспечение (включая все инженерные коммуникации производства), логистическое обеспечение (включая возможность обеспечения покупными и стандартными изделиями).

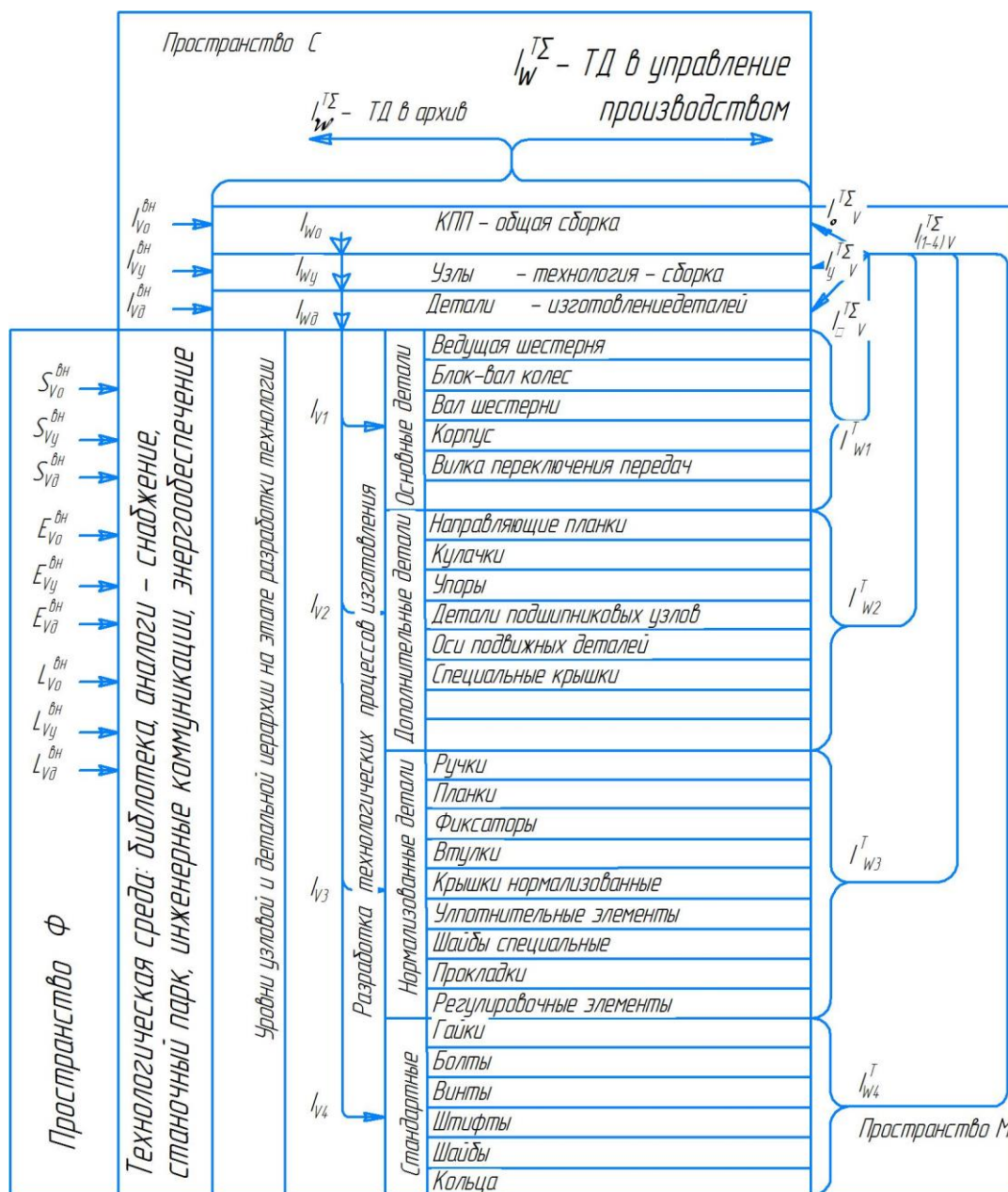


Рисунок 3. Принципиальная схема разработки технологии изготовления КПП с учетом циркуляции информационных потоков по всем иерархическим уровням.

Осуществление учета всех возможных ресурсов предприятия на этапе разработки технологии при технологической подготовке производства дает возможность обеспечить минимизацию затрат на всех этапах производства за счет

оптимизации размещения заказов на изготовление как на собственном производстве, так и при передаче на аутсорсинг определенной части работ. Например при расчете вариантов затрат в случае изготовления литого корпуса КПП на другом предприятии, или принятие сварного варианта, возможного для реализации на собственном производстве. Также можно сравнивать затраты при изготовлении зубчатых колес, при изготовлении достаточно сложного в геометрическом отношении блок-вала колес.

Общая информация о технологии  $I_W^{T\Sigma}$  представляет конъюнкцию всех частных технологических процессов сборочных узлов, процессов изготовления всех деталей, входящих в узлы механизма и в механизм в целом:

$$I_W^{T\Sigma} \in I_{W_j}^{Tc\delta} \cap I_{W_i}^{T\delta} \cap \dots \cap I_r^{T\delta} \quad (3)$$

Используя разнонаправленность и относительную плотность информационных потоков, привязанность к конструктивным и технологическим элементам структур технических систем можно осуществлять оптимизацию процессов обработки деталей и изготовления изделий на ранних стадиях проектирования (путем оптимизации) частных составляющих на каждой детали или сборки, отражаемых частными входящими в выражение (3) составляющими элементами. Суммарные потоки информации, входящие  $I_V^\Sigma$  в технологическую систему, или выходящие  $I_W^\Sigma$  из нее, состояются из частных информационных потоков  $I_{Vr}$  входящих, и  $I_{Wk}$  - выходящих, с помощью которых полностью определяется уровень возможной как технической, так и возможной иного вида обеспеченности процесса – материальной, финансовой, управленческой и т.д. Принадлежность частного информационного потока к тому или иному элементу технической системы обозначается соответствующим дополнительным индексом, и характеризует соответствующие технические показатели деталей или технологических аспектов в отношении подузлов и деталей при конструировании, вариантов выбираемых технологических воздействий при изготовлении.

На последующих этапах проектирования могут уточняться затраты на реализацию тех или иных процессов при создании новых машин и механизмов, опять же итеративно приближаясь к оптимальному варианту или запланированному показателю на основе рекуррентного подхода, а также минимизировать необходимое для проектирования и изготовления изделия время.

### 3. Заключение

Проведенные в данной работе аналитические исследования применительно к процессу проектирования технической системы изготовления на примере коробки переключения передач без разрыва потока передаваемой мощности, включающей этапы конструкторских работ, разработки технологии изготовления, пока безотносительно к типу производства (опытный образец или серийное производство, что безусловно налагает свои дополнительные связи на проектные работы), показали адекватность и актуальность системы создания функционально-ориентированных технологий в сфере машиностроения для разных деталей и узлов. Исследования позволили достичь поставленной в работе цели путем решения ряда некоторых частных задач.

1. Определены пути передачи информационных потоков и их пространственная принадлежность с начального этапа создания нового технического изделия, а именно, с

зарождения идеи на основании запроса, до реализации в материал на жизненном цикле. Указаны узловые моменты в процессе проектирования, определяющие выбранный вариант направления дальнейшей разработки на разных иерархических уровнях.

2. Установлены и выделены обобщающие и частные информационные потоки, их направленность и степень влияния на общий процесс проектирования технической системы и на частные технические решения, позволяющие находить оптимальные временные, ресурсные и управленческие выходы.

3. Показана возможность установления в рамках условно действующего производства основных технологических переделов уже на стадии конструирования механизма и его деталей, и тем более на стадии технологического проектирования, а также широкой интерпретации и применения новых технологических возможностей на стадии изготовления.

### ЛИТЕРАТУРА:

1. Дьяков, И. Ф. Ступенчатые и планетарные коробки передач транспортных машин. Учебное пособие / И. Ф. Дьяков, В. И. Тарханов – Ульяновск: УлГТУ, 2011. – 143 с. – ISBN 978-5-9795-0773-6.

2. Гируцкий, О. И. Развитие конструкций и перспективы автоматических трансмиссий / О. И. Гируцкий, В. П. Тарасик, С. А. Рынкевич // Научное издание МГТУ им. Н. Э. Баумана. Наука и образование, № ФС77-48211 Государственная регистрация №0421200025, – М.: ФГУП НАМИ, – Могилев: Белорусско - Российский университет, 1994. – 360 с.

3. Базров, Б. М. Основы технологии машиностроения. Учебное пособие / Б. М. Базров. – М.: Машиностроение, 2005.

4. Михайлов, А. Н. Основы синтеза функционально-ориентированных технологий машиностроения / А.Н. Михайлов – Донецк: ДонНТУ, 2009. – 346 с.

5. Михайлов, А. Н. Особенности проектирования функционально-ориентированных технологических процессов / А. Н. Михайлов, А. В. Костенко // Сборник трудов материалов международного научного симпозиума технологов-машиностроителей, Ростов-на-Дону, 14-17сент. 2016 г. – Ростов н/Д: ДГТУ, 2016. – С. 21–24.

6. Суслов, А. Г. Функционально-ориентированные технологии обработки рабочих поверхностей деталей машин / А. Г. Суслов – М.: Московский государственный индустриальный университет, 2014.

7. Цветков, В. Д. Системно-структурное моделирование и автоматизация проектирования технологических процессов / В. Д. Цветков – Минск: Наука и техника, 1979. – 264 с.

8. Хейфец, М. Л. Проектирование процессов комбинированной обработки / М. Л. Хейфец – М.: Машиностроение, 2005. – 272 с.

9. Технологическая наследственность в машиностроении / А. М. Дальский, Б. М. Базров, А. С. Васильев и [др.] / Под ред. А. М. Дальского. – М.: МАИ, 2000. – 364 с.

10. Технический контроль в машиностроении: Справочник проектировщика / Под общ. ред. В. Н. Чупырина, А. Д. Никифорова. – М.: Машиностроение, 1987. – 512 с.

11. Термическая обработка в машиностроении: Справочник. / Под ред. Ю. М. Лахтина, А. Г. Рахштадта. – М.: Машиностроение, 1980. – 783 с.

Поступила в редколлегию 15.05.2020 г.

УДК 621.45.0.002.2(075.8)

<sup>1</sup> Д. А. Михайлов, канд. техн. наук, доц., <sup>2</sup> В. А. Михайлов, инженер,<sup>1</sup> Е. А. Шейко, канд. техн. наук, доц., <sup>2</sup> А. Н. Михайлов, д-р техн. наук, проф.<sup>1</sup> ГОУВПО «Донецкая академия гражданской защиты», г. Донецк, ДНР<sup>2</sup> ГОУВПО «Донецкий национальный технический университет», г. Донецк, ДНРТел.: +38 071 3060879; E-mail: [mntk21@mail.ru](mailto:mntk21@mail.ru)

## МЕТОДИКА СИНТЕЗА СВЯЗНОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ МНОГОСЛОЙНОГО ФУНКЦИОНАЛЬНО-ОРИЕНТИРОВАННОГО ПОКРЫТИЯ ЛОПАТОК ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ

*В работе представлены принципы и особенности синтеза многослойного функционально-ориентированного покрытия с пространственным контуром границ каждого слоя для каждой лопатки, для лопаток группы и групп лопаток относительно друг друга, которое выполняется из условия равенства их ресурсов и повышения ресурса всех лопаток в газотурбинном двигателе. А также разработана методика синтеза многосвязного технологического процесса формирования функционально-ориентированного покрытия. Выполнена экспериментальная реализация технологического процесса формирования функционально-ориентированных покрытий лопаток. Разработан алгоритм проектирования отделочно-упрочняющей обработки лопаток и представлено технологическое обеспечение формирования функционально-ориентированного покрытия лопаток.*

**Ключевые слова:** газотурбинный двигатель, группа лопаток, функционально-ориентированное покрытие, пространственный контур границ, схема синтеза, многосвязный технологический процесс.

D. A. Mikhaylov, V. A. Mikhaylov, E. A. Sheyko, A. N. Mikhaylov

## METHOD FOR SYNTHESIS OF A CONNECTED TECHNOLOGICAL PROCESS OF FORMING A MUL-TI-LAYERED FUNCTIONALLY-ORIENTED COVERING OF A GAS-TURBINE ENGINE BLADES

*The work presents the principles and features of the synthesis of a multilayer functionally oriented coating with a spatial contour of the boundaries of each layer for each blade, for the blades of a group and groups of blades relative to each other, which is performed on the condition that their resources are equal and the resource of all blades in the gas turbine engine is increased. And also a technique for the synthesis of a multiply connected technological process for the formation of a functionally oriented coating has been developed. The experimental implementation of the technological process of forming functionally oriented coating of the blades. An algorithm for designing finishing and hardening processing of blades is developed, and technological support for the formation of a functionally oriented coating of blades is presented.*

**Keywords:** gas turbine engine, group of blades, functionally oriented coating, spatial contour of boundaries, synthesis scheme, multiply connected technological process.

### 1. Введение

В настоящее время, для повышения ресурса деталей авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) применяется множество различных методов отделочно-упрочняющей обработки (ОУО) [1, 2, 3] и технологических процессов их обработки [4, 5, 6], обеспечивающих достижения заданных свойств. При этом лопатки ГТД являясь основными элементами авиационного двигателя, также требуют особых технологических подходов в достижении необходимых свойств и обеспечения заданного их ресурса. Это обусловлено тем, что лопатки ГТД эксплуатируются в сложных эксплуатационных условиях, имеют сложную пространственную форму и расположение в двигателе.

Для повышения ресурса лопаток ГТД в работе [7] предлагается для них обеспечивать функционально-ориентированные свойства (ФОС), например, на базе функционально-ориентированных покрытий [8, 9, 10]. ФОП это специальное покрытие лопатки,

которое обеспечивает возможность исключения износа основного материала лопатки в заданный период эксплуатации. Выполненные исследования показывают, что обычные покрытия лопаток не исключают износ основного материала пера лопатки, или имеют очень низкий ресурс по износу покрытия. Это обусловлено тем, что на перо лопатки действуют неодинаковые и неравномерные эксплуатационные функции, которые приводят к быстрому износу покрытия на входной и периферийной кромках лопатки, что вызывает катастрофический износ основного материала лопатки. Это снижает ресурс лопаток и ГТД в целом. Кроме того, ГТД структурируется из целого комплекса подсистем с группами лопаток различного назначения, на которые действуют различные эксплуатационные функции, приводящие к различному износу лопаток групп и групп лопаток относительно друг друга.

Для выравнивания износа лопаток групп ГТД применяются различные технологии, в том числе и многосвязные процессы [11]. Однако, для решения вопросов повышения ресурса лопаток всего ГТД и выравнивания ресурса лопаток групп и групп лопаток относительно друг друга необходимы дальнейшие исследования по развитию вопроса применения ФОП для лопаток всего ГТД

Целью данной работы является повышение ресурса лопаток ГТД за счет комплексного формирования ФОС лопаток, обеспечения равного ресурса лопаток каждой группы и групп лопаток относительно друг друга, работающих в условиях действия неравномерных эксплуатационных функций, на основе разработки метода синтеза многосвязного технологического процесса реализации многослойных ФОП лопаток, образованных на базе установленных эксплуатационных, технологических и конструктивных связей.

В соответствии с поставленной целью в работе планируется решение следующих задач:

- выполнить анализ особенностей синтеза ФОП для лопатки, группы лопаток и групп лопаток относительно друг друга в ГТД;
- разработать методику реализации многосвязного технологического процесса формирования ФОП лопатки, лопаток в группе и групп лопаток относительно друг друга в ГТД на базе принципа их равенства ресурса;
- провести реализацию технологического процесса формирования ФОП групп лопаток компрессора, разработать алгоритм реализации ОУО лопаток с ФОП.

Эти задачи решаются в данной работе.

## **2. Особенности синтеза функционально-ориентированного покрытия для лопатки, группы лопаток и групп лопаток**

ФОП это специальное покрытие, имеющее функционально-ориентированные свойства (ФОС), выполненное на изделии (лопатке) в соответствии с группой особых принципов ориентации [7, 8], свойства которого формируется в пространстве и во времени в соответствии с изменяющимися параметрами действия эксплуатационных функций в механизме. В этом случае, ФОП могут быть однослойными и многослойными. При этом в однослойном покрытии, изменяющиеся свойства могут быть получены за счет изменяющихся физико-механических свойств и толщины покрытия. В многослойном покрытии, изменяющиеся свойства покрытия могут реализовываться за счет изменяющихся физико-механических свойств и толщины каждого слоя, модуля слоев, а также за счет формирования специального покрытия [8, 9, 10], состоящего из слоев постоянной толщины с пространственным контуром границ (ПКГ) каждого слоя.

Можно отметить, что ГТД структурируется из целого комплекса различных подсистем, узлов и элементов. При этом лопатки ГТД формируются в несколько групп, а именно: лопатки компрессора, лопатки турбины, лопатки свободной турбины. Здесь, лопатки каждой группы могут подразделяться на подгруппы. Например, лопатки компрессора подразделяются на следующие подгруппы: лопатки входного направляющего аппарата, поворотные лопатки направляющего аппарата, лопатки направляющего аппарата, лопатки спрямляющего аппарата, рабочие лопатки ротора. Причем на группы и подгруппы лопаток ГТД действует целый комплекс различных эксплуатационных функций [1, 2, 3, 8]. Эти неодинаковые, изменяющиеся эксплуатационные воздействия приводят к следующим особенностям:

- неравномерному износу поверхностей и элементов пера лопатки;
- неравномерному износу лопаток в каждой группе;
- неравномерному износу групп лопаток относительно друг друга.

Можно отметить, что лопатки каждой группы имеют свои определенные особенности износа и соответственно длительности ресурса каждой лопатки. При этом неравномерность износа поверхностей и элементов пера лопатки приводят, в ряде случаев к невозможности восстановления лопатки при ремонте. Неравномерность износа лопаток в каждой группе приводит к неполному использованию одних лопаток группы относительно других, что снижает потенциальные возможности в повышении их ресурса. А также неравномерный износ групп лопаток относительно друг друга приводит к неполному использованию одних групп лопаток относительно других групп. Это также снижает потенциальные возможности в повышении их ресурса.

ФОП лопаток ГТД позволяют решать следующие задачи:

- исключить неравномерный износ поверхностей пера лопатки и повысить ресурс каждой лопатки;
- обеспечить одинаковый износ всех лопаток каждой группы и выполнить равный их ресурс;
- обеспечить одинаковый износ групп лопаток относительно других групп лопаток и выполнить равный их ресурс.

Применение ФОП для лопаток ГТД обеспечивает следующее:

- обеспечить повышение ресурса лопаток;
- выровнять ресурс лопаток в каждой группе и групп лопаток относительно друг друга;
- обеспечить повышение эксплуатационного потенциала лопаток;
- увеличить ремонтпригодность лопаток;
- многократное их восстановление работоспособности при ремонтах.

В данной работе будут рассмотрены вопросы формирования многослойного покрытия переменной толщины из слоев постоянной толщины, выполняемые на базе вакуумно-плазменных тонких покрытий. При этом эти вопросы будут рассмотрены для лопаток компрессора ГТД.

В качестве примера, на рисунке 1 представлена гипотетическая схема многослойного ФОП с ПКГ слоев лопатки компрессора ГТД. В этом случае, ФОП лопатки можно представить множеством кортежей, формируемых их слоев покрытия, имеющих ПКГ:

$$\Phi ОП = \{(A_1, G_1), (A_2, G_2), (A_3, G_3), \dots, (A_i, G_i), \dots, (A_n, G_n)\}; \quad (1)$$

где  $(A_i, G_i)$  -  $i$ -й кортеж, состоящий из  $i$ -го слоя покрытия  $A_i$ , имеющего  $i$ -й ПКГ слоя  $G_i$ ;

$n$  – количество слоев и ПКГ ФОП.

В выражении (1) множества слоев ФОП и их ПКГ можно представить следующими множествами:

$$A = \{A_1, A_2, A_3, \dots, A_i, \dots, A_n\}, \tag{2}$$

$$G = \{G_1, G_2, G_3, \dots, G_i, \dots, G_n\}; \tag{3}$$

где  $A$  и  $G$  – множество слоев и ПКГ многослойного ФОП.

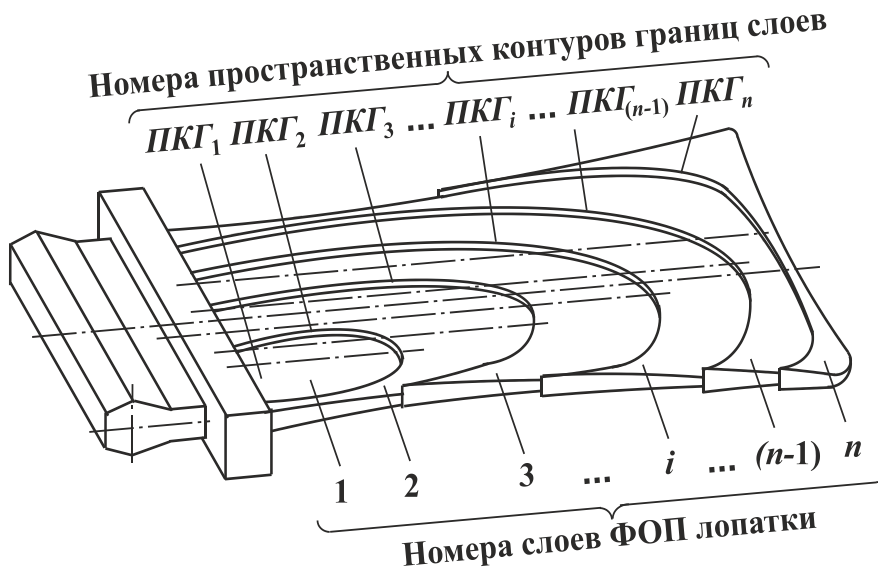


Рисунок 1. Гипотетическая схема многослойного ФОП с ПКГ слоев лопатки компрессора ГТД

Можно отметить, что в соответствии работами [8, 9, 10] ФОП лопатки формируется на базе группы особых принципов [7] ориентации свойств, технологических воздействий, определяемых в зависимости от особенностей эксплуатации опытного покрытия в ГТД. В этом случае, на основе принципов функционального и топографического

соответствия [7] ПКГ ФОП формируется в соответствии со следующим выражением:

$$\left. \begin{aligned} PKГ_1 &\sim PKГ_{1Э}, \\ PKГ_2 &\sim PKГ_{2Э}, \\ PKГ_3 &\sim PKГ_{3Э}, \\ \dots &\dots \dots \\ PKГ_i &\sim PKГ_{iЭ}, \\ \dots &\dots \dots \\ PKГ_n &\sim PKГ_{nЭ}; \end{aligned} \right\} \tag{4}$$

где  $PKГ_i$  – пространственный контур границ  $i$ -го слоя покрытия пера лопатки (геометрические параметры);

$PKГ_{iЭ}$  – пространственный контур границ  $i$ -го измерения ПКГ износа опытного покрытия пера лопатки (геометрические параметры), получаемого в процессе его эксплуатации [10];



$\sphericalangle$  - знак бинарного соответствия геометрических параметров ПКГ покрытия и ПКГ зоны износа опытного покрытия.

Система выражений (4) показывает бинарное соответствие геометрических параметров всех слоев ФОП геометрическим параметрам зон износа опытного покрытия [10] лопатки в процессе ее эксплуатации в ГТД. При этом ПКГ износа опытного покрытия в процессе эксплуатации лопатки в ГТД определяется с периодом, определяемым в соответствии со следующим выражением:

$$t_i = \frac{T_o}{n}, \quad (5)$$

где  $t_i$  – длительность периода замеров геометрических параметров ПКГ опытного покрытия лопатки ( $t_1 = t_2 = t_3 = \dots = t_i = \dots = t_n$ );

$T_o$  – длительность гарантированного ресурса ГТД.

Следует отметить, что ФОП на лопатке ГТД, в соответствии с разработанным способом его создания [10], формируется на базе эксплуатационного испытания опытного покрытия. Именно по этим данным строится ПКГ ФОП. При этом физико-механические свойства опытного покрытия и покрытия каждого слоя ФОП должны быть одинаковыми:

$$\Phi MC_{\text{оп}} \sphericalangle \Phi MC_{\text{ФОП}}$$

где  $\Phi MC_{\text{оп}}$  – физико-механические свойства опытного покрытия лопатки, применяемого для определения параметров ПКГ  $i$ -го слоя покрытия пера лопатки ( $ПКГ_{i\varnothing}$ ) в процессе эксплуатации;

$\Phi MC_{\text{ФОП}}$  – физико-механические свойства слоев ФОП пера лопатки.

Для ФОП общая максимальная толщина покрытия  $H$  определяется в соответствии со следующим выражением:

$$H = \sum_{i=1}^n h_i, \quad (6)$$

где  $h_i$  – толщина  $i$ -го слоя ФОП.

Можно отметить, что многослойное ФОП лопаток обычно структурируется из слоев одинаковой толщины. В этом случае, можно записать следующее выражение:

$$h_1 = h_2 = h_3 = \dots = h_i = \dots = h_n. \quad (7)$$

При этом толщина каждого слоя ФОП формируется из условия равенства толщин всех слоев толщине опытного покрытия:

$$h_i = h_{\text{оп}}, \quad (8)$$

Можно отметить, что многослойное ФОП может формироваться, как из слоев равной толщины, так и из слоев не одинаковой толщины. При формировании ФОП из слоев не одинаковой толщины, длительность периода замеров геометрических пара-

метров ПКГ опытного покрытия лопатки будет пропорциональна каждому слою, наносимому ФОП.

На рисунке 2 представлена схема синтеза многослойного ФОП с ПКГ каждого слоя для лопаток ГТД.

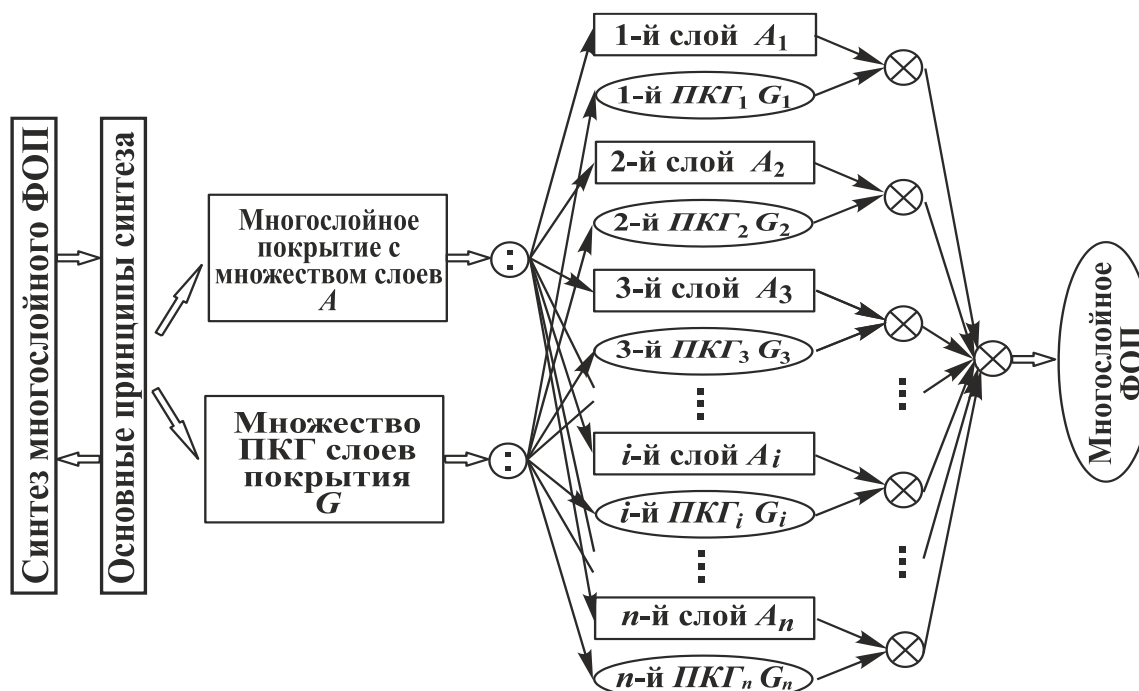


Рисунок 2. Схема синтеза многослойного ФОП с ПКГ каждого слоя для лопаток ГТД:  $\odot$  - знак операции декомпозиции,  $\otimes$  - знак операции композиции

Таким образом, ФОП лопатки позволяет решать вопросы повышения ресурса ГТД. Вместе с тем, ГТД имеет структуру, состоящую из нескольких подсистем, в которых структурированы лопатки. В этом случае, ФОП лопаток различных групп (компрессор, турбина, свободная турбина) должны формироваться из условия обеспечения равного ресурса:

$$R_1 = R_2 = R_3 = \dots = R_j = \dots = R_J, \tag{9}$$

где  $R_j$  - ресурс  $j$ -ой группы лопаток ГТД;  
 $J$  – общее количество групп лопаток ГТД (каждая группа лопаток имеет свои определенные особенности эксплуатации и износа пера лопатки).

В этом случае, можно отметить, что в целом, ФОП для всех групп должно формироваться на базе следующего выражения:

$$\left. \begin{array}{l}
 R_{11} = R_{12} = R_{13} = \dots = R_{1k_1} = \dots = R_{1K_1}; \\
 R_{21} = R_{22} = R_{23} = \dots = R_{2k_2} = \dots = R_{2K_2}; \\
 R_{31} = R_{32} = R_{33} = \dots = R_{3k_3} = \dots = R_{3K_3}; \\
 \dots \dots \dots \\
 R_{j1} = R_{j2} = R_{j3} = \dots = R_{jk_j} = \dots = R_{jK_j}; \\
 \dots \dots \dots \\
 R_{J1} = R_{J2} = R_{J3} = \dots = R_{JK_J} = \dots = R_{JK_J},
 \end{array} \right\} (10)$$

где  $R_{jk_j}$  - ресурс  $k_j$ -ой лопатки  $j$ -ой группы лопаток ГТД;

$K_j$  – общее количество лопаток в  $j$ -ой группе.

Таким образом, приведенные материалы поясняют особенности формирования ФОП каждой лопатки, лопаток в группе, и групп лопаток из условия равенства их ресурсов.

### **3. Методика реализации многосвязного технологического процесса формирования ФОП групп лопаток на базе принципа равенства ресурса**

Можно отметить, что ГТД состоит из целого комплекса различных подсистем и узлов. При этом в этих подсистемах ГТД в процессе их эксплуатации действуют различные, в том числе изменяющиеся эксплуатационные функции. Это приводит к различному износу элементов и деталей в различных подсистемах. Особенно это относится к лопаткам ГТД, которые эксплуатируются в следующих подсистемах: лопатки компрессора низкого давления, лопатки компрессора высокого давления, лопатки турбины компрессора высокого давления, лопатки турбины низкого давления, лопатки свободной турбины. Причем в каждой подсистеме ГТД имеются несколько групп лопаток испытывающие неравномерные неодинаковые износы поверхностей. Это приводит неодинаковому износу рабочей поверхности каждой лопатки, лопаток в группе и групп лопаток относительно друг друга. Все это снижает ресурс ГТД из-за неодинаковых условий эксплуатации групп лопаток, не позволяет повышать ресурс авиационного двигателя, не позволяет решать вопросы полного использования эксплуатационного потенциала лопаток всех групп ГТД, повышения уровня ремонтпригодности лопаток за счет их восстановления при ремонтах.

Применение ФОП позволяет решать вопросы повышения ресурса каждой лопатки, выравнивания ресурса лопаток в каждой группе и групп лопаток относительно друг друга. Однако для решения этих вопросов необходимы специальные – многосвязные технологические процессы формирования ФОП групп лопаток на базе принципа равенства ресурса [11], формирования ФОП каждой лопатки, лопаток в группе и групп лопаток относительно друг друга, представленных выражениями (9) и (10).

Многосвязный технологический процесс формирования ФОП, это специальный процесс, предназначенный для реализации многослойного покрытия каждой лопатки, лопаток в группе и групп лопаток относительно друг друга из условия обеспечения равного ресурса всех лопаток, на основе установленных связей отдельных процессов их реализации, для комплексного повышения ресурса ГТД [11].

На схеме рисунка 3 представлены основные этапы методики реализации связанного технологического процесса формирования ФОП групп лопаток на базе принципа равенства ресурса. Она содержит следующие этапы реализации [8, 11]:

1. Задаются начальные данные процесса. Назначается гарантированный ресурс лопаток компрессора ГТД. Например, для турбовального ГТД модели ТВ3-117 гарантированный ресурс составляет  $T_o = R = 6000$  час.

2. Предварительно устанавливаются параметры средней интенсивности износа  $\mu_{Ri}$  покрытия групп лопаток компрессора ГТД. Например, для турбовальных двигателей модели ТВ3-117, такие параметры представлены в работе [7]. Эти исследования выпол-

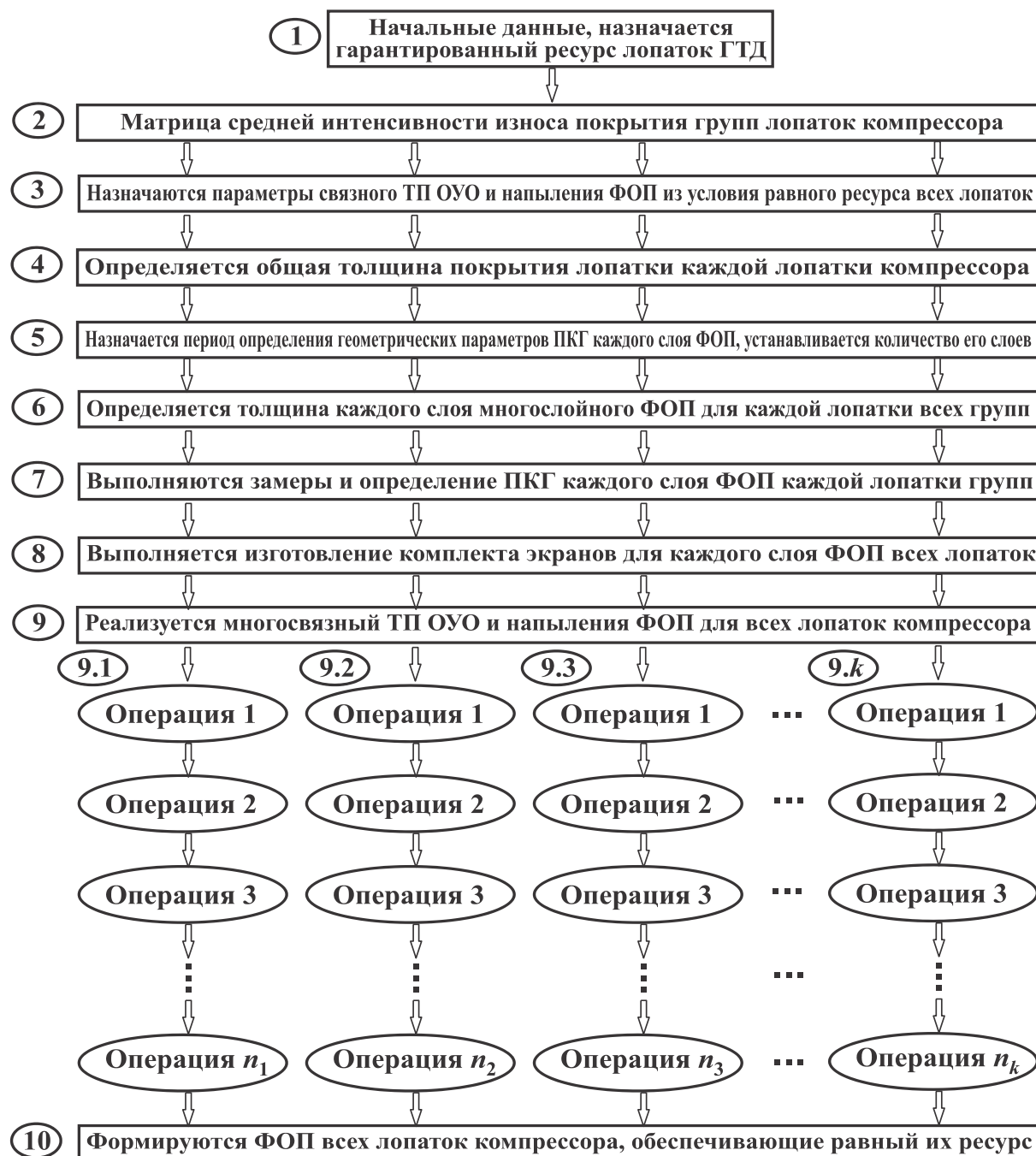


Рисунок 3. Основные этапы методики реализации связанного технологического процесса формирования ФОП групп лопаток на базе принципа равенства ресурса

нены на основании износа лопаток для двадцати ГТД, ремонтируемых на ОАО «Луганский авиаремонтный завод».

3. Назначаются параметры связного технологического процесса (ТП) ОУО и напыления ФОП из условия равного ресурса всех лопаток компрессора [11, 12, 13]. В данном случае, предусмотрено напыление двух вариантов покрытий, а именно:

- нитрид титановое покрытие,
- нитрид алюминий титановое покрытие.

4. Определяется общая толщина покрытия каждой лопатки компрессора. Общая толщина покрытия лопатки в зоне максимального его износа (расположенной, например, на пересечении входной и периферийной кромок для рабочих лопаток). Она определяется по формуле:

$$H = \mu_{Ri} T_o, \quad (11)$$

где  $H$  - общая толщина покрытия лопаток;

$\mu_{Ri}$  – интенсивность износа  $i$ -го слоя покрытия.

Результаты расчетов общих толщин нитрид титанового и нитрид алюминий титанового покрытия для лопаток различных групп компрессора ГТД модели ТВЗ-117 представлены в таблице 1 и таблице 2. В таблице 1 ... таблице 6 введены следующие сокращения: ВНА – входной направляющий аппарат, НА – направляющий аппарат, ВСА – выходной спрямляющий аппарат, ПЛ – поворотная лопатка, НЛ – неподвижная лопатка. А также, здесь имеются обозначения:  $H_{Ri}$  – общая толщина многослойного ФОП для  $R_i$  –ой лопатки ГТД;  $h_{Ri}$  - толщина слоя ФОП для  $R_i$  –ой лопатки ГТД;  $t_{Ri}$  – время напыления слоя ФОП для  $R_i$  –ой лопатки ГТД.

5. Назначается период определения геометрических параметров ПКГ каждого слоя ФОП.

Данный период можно определить с учетом следующего условия:

$$T_o = \sum_{i=1}^n t_i, \quad (12)$$

где  $n$  – количество слоев многослойного ФОП или число периодов определения геометрических параметров ПКГ;

$t_i$  –  $i$ -й период.

Если  $t_1 = t_2 = t_3 = \dots = t_n$ , то значение периода определения геометрических параметров ПКГ находим в соответствии с выражением (5)

Количество слоев многослойного ФОП каждой лопатки соответствует числу периодов определения геометрических параметров ПКГ покрытия.

В случае  $n = 4$  период определения геометрических параметров ПКГ покрытия лопаток при гарантированном ресурсе  $T_o = R = 6000$  час составляет  $t_i = 1500$  час.

6. Определяется толщина каждого слоя многослойного ФОП. В случае, если толщины слоев каждого ФОП лопатки равны  $h_1 = h_2 = h_3 = \dots = h_n$  толщина каждого слоя покрытия определяется на основании выражения (6) по следующему выражению:

$$h_i = \frac{H}{n}. \quad (13)$$

Таблица 1. – Значения общей толщины покрытия лопаток компрессора (статор) ГТД модели ТВ3-117 (четырёхслойное покрытие)

Номера групп лопаток компрессора (статор)												
1	2				3				4			
ВНА	ПЛ НА				НЛ НА				ВСА			
Номера ступеней												
1	1	2	3	4	1	2	3	4	5	6	7	1
Заданная общая толщина покрытия лопатки, $H_{Ri}$ мкм												
$H_{101}$	$H_{201}$	$H_{202}$	$H_{203}$	$H_{204}$	$H_{301}$	$H_{302}$	$H_{303}$	$H_{304}$	$H_{305}$	$H_{306}$	$H_{307}$	$H_{401}$
Для нитрид титанового покрытия (катоды ВТ 1-0)												
3,96	4,86	4,74	4,62	4,26	4,08	3,96	4,32	4,98	5,46	5,70	5,76	6,30
Для нитрид алюминий титанового покрытия (катоды Ti-9Al)												
3,42	4,20	4,08	3,96	3,72	3,54	3,54	3,72	4,32	4,68	4,98	5,22	5,46

Таблица 2. – Значения общей толщины покрытия лопаток компрессора (ротор) ГТД модели ТВ3-117 (четырёхслойное покрытие)

Номер группы лопаток компрессора (ротор)											
5											
Номер ступени											
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Заданная общая толщина покрытия лопатки, $H_{Ri}$ мкм											
$H_{501}$	$H_{502}$	$H_{503}$	$H_{504}$	$H_{505}$	$H_{506}$	$H_{507}$	$H_{508}$	$H_{509}$	$H_{510}$	$H_{511}$	$H_{512}$
Для нитрид титанового покрытия (катоды ВТ 1-0)											
7,26	7,14	6,54	6,36	6,12	6,18	6,48	7,50	8,16	8,52	8,64	9,06
Для нитрид алюминий титанового покрытия (катоды Ti-9Al)											
6,30	6,18	5,94	5,52	5,28	5,34	5,58	6,48	7,08	7,44	7,50	7,92

Таблица 3. – Значения толщины каждого слоя покрытия лопаток компрессора (статор) ГТД модели ТВ3-117 (четырёхслойное покрытие)

Номера групп лопаток компрессора (статор)												
1	2				3				4			
ВНА	ПЛ НА				НЛ НА				ВСА			
Номера ступеней												
1	1	2	3	4	1	2	3	4	5	6	7	1
Заданная толщина слоя покрытия лопатки, $h_{Ri}$ мкм												
$h_{101}$	$h_{201}$	$h_{202}$	$h_{203}$	$h_{204}$	$h_{301}$	$h_{302}$	$h_{303}$	$h_{304}$	$h_{305}$	$h_{306}$	$h_{307}$	$h_{401}$
Для нитрид титанового покрытия (катоды ВТ 1-0)												
0,99	1,21	1,18	1,15	1,06	1,02	0,99	1,08	1,24	1,36	1,42	1,44	1,57
Для нитрид алюминий титанового покрытия (катоды Ti-9Al)												
0,85	1,05	1,02	0,99	0,93	0,88	0,88	0,93	1,08	1,17	1,24	1,30	1,36

Таблица 4. – Значения толщины каждого слоя покрытия лопаток компрессора (ротор) ГТД модели ТВ3-117 (четырёхслойное покрытие)

Номер группы лопаток компрессора (ротор)											
5											
Номер ступени											
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Заданная толщина слоя покрытия лопатки, $h_{Ri}$ мкм											
$h_{501}$	$h_{502}$	$h_{503}$	$h_{504}$	$h_{505}$	$h_{506}$	$h_{507}$	$h_{508}$	$h_{509}$	$h_{510}$	$h_{511}$	$h_{512}$
Для нитрид титанового покрытия (катоды ВТ 1-0)											
1,81	1,78	1,63	1,59	1,53	1,54	1,62	1,87	2,04	2,13	2,16	2,26
Для нитрид алюминий титанового покрытия (катоды Ti-9Al)											
1,57	1,54	1,48	1,38	1,32	1,33	1,39	1,62	1,77	1,86	1,87	1,98

Результаты определения толщин слоев покрытий заносятся в таблицу 3 и таблицу 4.

7. Выполняются замеры и определение ПКГ каждого слоя ФОП каждой лопатки групп для всего компрессора. Они производятся в соответствии с методикой, представленной в работе [11].

8. Выполняется изготовление комплекта экранов для каждого слоя многослойного ФОП для всех лопаток компрессора.

9. Реализуется многосвязный технологический процесс ОУО и напыления ФОП для всех лопаток компрессора. В этом случае выполняются процессы 9.1; 9.2; 9.3; ...; 9.k, где k – общее количество технологических процессов или различных лопаток компрессора. На рисунке 3 структура отдельных технологических процессов представлена гипотетически, при этом они связаны между собой параметрами толщин слоев покрытий, определяемых данными, приведенными в таблице 3 и таблице 4.

В этом случае данный комплексный многосвязный процесс выполняется на основе принципа равного ресурса всех лопаток компрессора. Это обеспечивается за счет ФОП с заданными параметрами толщин слоев покрытий определяемыми матрицами, представленными в работе [8, 10].

10. На базе многосвязного технологического процесса формируются ФОП всех лопаток компрессора, обеспечивающие равных их ресурс в условиях действия неравномерных эксплуатационных функций трех рангов.

Таким образом, представленная методика позволяет формировать многослойные ФОП лопаток компрессора, обеспечивающие равный ресурс лопаток в условиях действия неравномерных эксплуатационных функций трех рангов, посредством реализации комплексного многосвязного технологического процесса.

#### 4. Технологическая реализация процесса формирования ФОП групп лопаток компрессора

На рисунке 4 представлен алгоритм реализации отделочно-упрочняющей обработке (ОУО) лопаток компрессора всех групп с ФОП [8, 10]. Для реализации технологического процесса формирования ФОП групп лопаток компрессора необходимо иметь исходные данные. Поэтому данный алгоритм начинается с задание этих параметров.

Структура алгоритма реализации ОУО лопаток компрессора всех групп с ФОП выполняется в следующем порядке:

1. Задаются исходные данные процесса. При этом основными данными являются следующие параметры:

- равный (кратный) ресурс лопаток всех групп, связи параметров ФОП;
- количество слоев  $n$  ФОП;

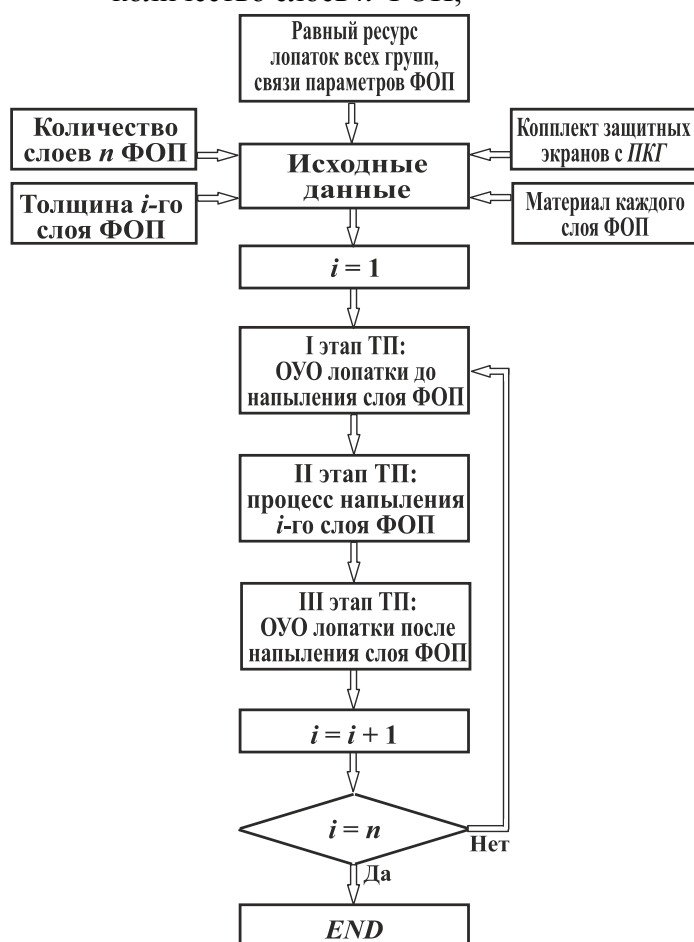


Рисунок 4. Алгоритм реализации ОУО лопаток компрессора всех групп с ФОП

переходит к I этапу технологического процесса (ТП) и повторяются все этапы (рисунок 4) и так далее.

8. Выполняется операция *END*.

Можно отметить, что на I этапе алгоритма технологического процесса выполняется очистка поверхностей лопаток компрессора, удаление пленок оксидов и нитридов с помощью ультразвуковой их обработки с использованием специальной жидкости, приспособлений и ультразвукового генератора УЗГ 4-1. Это необходимо для обеспечения ювенильности поверхностей лопаток компрессора при последующем напылении ФОП.

В предлагаемом технологическом процессе (рисунок 4) наиболее важным является процесс напыления каждого слоя ФОП, который выполняется на II этапе. В данном случае, этот процесс выполняется с использованием вакуумной ионно-плазменной установки (вакуумной электродуговой установки) ННВ 6.6-И1, общий вид которой представлен на рисунке 5.

- толщина  $i$ -го слоя ФОП;
- комплект защитных экранов для формирования всех слоев ФОП;
- материал каждого слоя ФОП.

2. Задается значение  $i = 1$ , где  $i$  – номер слоя ФОП.

3. Выполняется I этап технологического процесса (ТП). На этом этапе выполняется ОУО лопатки до напыления слоя ФОП.

4. Затем реализуется II этап технологического процесса (ТП). Здесь, осуществляется процесс напыления  $i$ -го слоя ФОП.

5. Далее, выполняется III этап технологического процесса (ТП). В этом случае производится ОУО лопатки после напыления слоя ФОП. На этом этапе обязательно осуществляется процесс полировки поверхности слоя покрытия лопатки.

6. Задается значение  $i = i + 1$ .

7. Если  $i = n$ , где  $n$  – общее количество слоев ФОП, процесс переходит следующему этапу и завершается. Если  $i = n$  процесс



Технологический процесс напыления каждого (одного) слоя ФОП (II этап) выполнялся в следующем порядке:

1. Производится загрузка лопаток компрессора, прогрев и откачка среды вакуумной камеры.



Рисунок 5. Общий вид вакуумной установки ННВ 6,6 – И1 для напыления ФОП лопаток компрессора

1.1. Выполняется установка защитных экранов с ПКГ на лопатки и их закрепление. Затем они размещаются на специальную оснастку, которая потом монтируется на планшайбу установки. При нанесении 1-го слоя ФОП устанавливаются защитные экраны с 1-м ПКГ экрана, при нанесении 2-го слоя ФОП – защитные экраны со 2-м ПКГ экрана, и так далее, пока не будут нанесены  $n$  слоев ФОП.

1.2. Производится откачка вакуумной камеры форвакуумным (механическим) насосом и затем паромасляным (диффузионным) насосом. Переключение насосов выполняется при давлении  $P = 10^{-1}$  Па.

1.3. Осуществляется прогрев вакуумной камеры горячей водой посредством ее подачи в рубашку корпуса.

2. Выполняется очистка поверхностей лопаток компрессора ионным травлением в газовом разряде.

2.1. Производится откачка давления вакуумной камеры до значения  $P = 2,6 \dots 6,5 \cdot 10^{-3}$  Па.

2.2. Выполняется отключение прогрева вакуумной камеры при давлении  $P = 2,6 \cdot 10^{-3}$  Па.

2.3. Производится включение системы охлаждения вакуумной камеры. Это способствует усилению процесса снижения давления вакуумной камеры.

2.4. Выполняется подача на приспособление и лопатки компрессора напряжения смещения до значения  $V_c = 1000$  В.

2.5. Осуществляется плавная подача аргона до появления слабого свечения в вакуумной камере возле лопаток компрессора или возникновения единичных искровых разрядов.

2.6. Производится выдержка лопаток компрессора в течении  $t = 2 \dots 3$  мин.

2.7. Выполняется повышение давления аргона в вакуумной камере до появления слабых искровых разрядов.

2.8. Производится уменьшение давления аргона в вакуумной камере до исчезновения искровых разрядов.

2.9. Производится выдержка лопаток компрессора в течении  $t = 2 \dots 3$  мин.

2.10. Выполняется повышение давления в вакуумной камере до значения  $P = 1$  Па, до тех пор, пока не исчезнут разряды.

2.11. Производится выдержка лопаток компрессора в течении  $t = 5$  мин.

2.12. Производится откачка вакуумной камеры до давления  $P = 2,6 \dots 6,5 \cdot 10^{-3}$  Па.

2.13. Далее, выполняется увеличение напряжения смещения на лопатках до значения  $V_c = 1200$  В.

2.14. Выполняется повторение пунктов 2.5 ... 2.11. При этом температура нагрева лопаток компрессора не должна превышать температуру  $480^{\circ}\text{C}$ , которая контролируется с помощью пирометра СМОТРИЧ.

2.15. Производится прекращение подачи аргона и выполняется выключение напряжения смещения.



Рисунок 6. Общий вид подсистем вакуумной установки: а – натекатели газа регулируемые, б – вакуумметр ионизационно-термопарный ВИТ-3

2.16. Осуществляется откачка давления вакуумной камеры до значения  $P = 2,6 \cdot 10^{-3}$  Па.

3. Выполняется очистка поверхности лопаток компрессора бомбардировкой ионами металла и нагрев до рабочих температур.

3.1. Выполняется подача на поворотное устройство лопаток компрессора напряжения смещения до значения  $V_c = 1200$  В.

3.2. Выполняется включение испарителя и установка минимально допустимого значения тока дуги, исключающего искровые разряды.

3.3. Производится ионная бомбардировка поверхностей лопаток компрессора посредством периодического включения и отключения тока дуги (время горения дуги  $t = 1 \dots 2$  с, перерыв  $20 \dots 60$  с).

3.4. Выполняется восстановление вакуума в камере до значений  $P > 1,1 \cdot 10^{-1}$  Па.



Рисунок 7. Общий вид шкафов управления вакуумной ионно-плазменной установки ННВ 6,6 – И1

3.5. Выполняют повторение пунктов 3.3 и 3.4 до полного исчезновения микродуг на поверхности лопаток компрессора (общее время ионной бомбардировки  $t = 5 \dots 7$  мин).

3.6. Производится предварительный прогрев лопаток компрессора при непрерывном горении дуги и давлении вакуума до значения  $P = 6,7 \cdot 10^{-3}$  Па.

3.7. Выполняется подача реакционного газа – азота и создается давление вакуума  $P = 6,7 \cdot 10^{-2}$  Па.

3.8. Осуществляется окончательный прогрев лопаток компрессора ионами азота и титана (катоды выполняются из сплава ВТ 1-0 и Ti-9Al).

3.9. Проводится контроль температуры нагрева лопаток компрессора с помощью пирометра СМОТРИЧ. При этом начальная температура лопаток компрессора принимается  $250^{\circ}\text{C}$ , а окончательная до значения  $480^{\circ}\text{C}$ .

4. Выполняется нанесение покрытия. В данной работе производится нанесение двух видов покрытий: нитрид титановое (катоды ВТ 1-0) и нитрид алюминий титановое (катоды Ti-9Al).

4.1. Выполняется выключение испарителей.

4.2. Производится отключение высокого напряжения, и выполняется подача на лопатки компрессора напряжения  $V_n = 40 \dots 350$  В. Величина этого напряжения устанавливается в зависимости от загрузки лопаток на приспособление (общий вес лопаток в зависимости от номера ступени компрессора и их количества).



Рисунок 8. Лопатка компрессора с 1-м слоем ФОП



Рисунок 9. Лопатка компрессора со 2-м слоем ФОП



Рисунок 10. Лопатка компрессора с 3-м слоем ФОП



Рисунок 11. Лопатка компрессора с 4-м слоем ФОП

4.3. Выполняется включение испарителей.

4.4. Осуществляется подача азота с помощью регулируемых натекателей (рисунок 6, а) и производится установка его рабочего давления  $P = 1,1 \cdot 10^{-1}$  Па. Контроль этого давления выполняется с помощью вакуумметра ионизационно-термопарного ВИТ-3 (рисунок 6, б)

4.5. Проводится установка тока дугового испарителя в пределах  $I_k = 40 \dots 150$  А. Ток дуговых испарителей устанавливается индивидуально в зависимости от материала катода и параметров оснастки с лопатками). Это выполняется с помощью систем управления, показанных на рисунке 7.

4.6. Производится включение механизма вращения оснастки с загруженными лопатками компрессора.

4.7. Производится конденсация покрытия в течение времени, необходимого для обеспечения заданной его толщины. При этом время напыления первого связующего покрытия на лопатки компрессора, из чистого титана, составляет  $t = 10 \dots 15$  с. Длительность напыления слоев ФОП из нитридов металлов для различных групп лопаток компрессора определяются в соответствии с данными, приведенными в таблице 5 и таблице 6.

4.8. Производится выключение испарителей установки.

5. Выполняется охлаждение, выгрузка лопаток из вакуумной камеры и контроль качества нанесения покрытия.

5.1. Выполняется выдержка лопаток компрессора в вакуумной камере в течение 1 ... 2 мин при рабочем опорном напряжении и давлении газа.

5.2. Выполняется выключение напряжения, прекращение подачи газа в вакуумную камеру, выключение механизма вращения.

5.3. Осуществляется охлаждение лопаток компрессора до температуры  $T_n > 40$  °С.

5.4. Выполняется выгрузка оснастки с лопатками компрессора. При этом лопатки (рисунок 8) снимаются с оснастки, контролируется качество нанесения покрытия (визуальный контроль и с помощью специальных методов) и передаются на III этап технологического процесса. После реализации 1-го слоя ФОП с первым ПКГ<sub>1</sub> (рисунок 8), выполняется 2-й слой ФОП со вторым ПКГ<sub>2</sub> (рисунок 9), затем наносится 3-й слой ФОП с третьим ПКГ<sub>3</sub> (рисунок 10), и так далее, последним наносится покрытие для всей лопатки (рисунок 11). Можно отметить, что после напыления каждого слоя покрытия выполняется полировка поверхностей лопаток для обеспечения адгезионной прочности слоев покрытий. Этот процесс реализуется на III этапе технологического процесса (рисунок 4).

На III этапе технологического процесса выполняется полировка поверхностей лопатки, включая покрытие, и передаются далее в соответствии с алгоритмом (рисунок 4) на I этап для реализации 2-го слоя ФОП и так далее. При этом полировка выполняется с использованием полировального станка, общий вид которого представлен на рисунке 12.

Таблица 5. – Длительность напыления каждого слоя покрытия лопаток компрессора (статор) ГТД модели ТВ3-117 (четырёхслойное покрытие)

Номера групп лопаток компрессора (статор)												
1	2				3				4			
ВНА	ПЛ НА				НЛ НА				BCA			
Номера ступеней												
1	1	2	3	4	1	2	3	4	5	6	7	1
Значение длительности напыления каждого слоя покрытия лопатки, $t_{Ri}$ , с												
$t_{101}$	$t_{201}$	$t_{202}$	$t_{203}$	$t_{204}$	$t_{301}$	$t_{302}$	$t_{303}$	$t_{304}$	$t_{305}$	$t_{306}$	$t_{307}$	$t_{401}$
Для нитрид титанового покрытия (катоды ВТ 1-0)												
71	87	85	83	76	73	71	78	89	98	102	104	113
Для нитрид алюминий титанового покрытия (катоды Ti-9Al)												
59	76	73	71	67	63	63	67	78	84	89	94	98

Таблица 6. – Длительность напыления каждого слоя покрытия лопаток компрессора (ротор) ГТД модели ТВ3-117 (четырёхслойное покрытие)

Номер группы лопаток компрессора (ротор)											
5											
Номер ступени											
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Значение длительности напыления каждого слоя покрытия лопатки, $t_{Ri}$ , с											
$t_{501}$	$t_{502}$	$t_{503}$	$t_{504}$	$t_{505}$	$t_{506}$	$t_{507}$	$t_{508}$	$t_{509}$	$t_{510}$	$t_{511}$	$t_{512}$
Для нитрид титанового покрытия (катоды ВТ 1-0)											
130	128	117	114	110	111	117	135	147	153	156	163
Для нитрид алюминий титанового покрытия (катоды Ti-9Al)											
113	111	107	99	95	96	100	117	127	134	135	143

Основным результатом данной работы является практическая реализация комплексного связанного технологического процесса ОУО лопаток компрессора с ФОП. Данный процесс обеспечивает выполнение свойств всех лопаток компрессора из условия равного их ресурса в условиях действия



Рисунок 12. Общий вид установки для полировки лопаток компрессора

неравномерных эксплуатационных воздействий трех родов, возникающих в компрессоре в различных группах лопаток.

В целом, разработанная структура комплексного связанного технологического процесса ОУО лопаток компрессора с ФОП формируется в соответствии со схемой рисунка 13.

На рисунке 13 приведена схема комплексного связанного технологического процесса ОУО лопаток компрессора с ФОП. Здесь показано, что процесс реализации технологического процесса выполняется на базе

обеспечения одинакового (равного) ресурсам всех лопаток компрессора ГТД. При этом структура этого процесса формируется из  $R$  технологических процессов (ТП) напыления  $ФОП_R$  для  $R$  различных лопаток всего компрессора. В этом случае, каждый технологический процесс состоит из  $n_i$  технологических подпроцессов, каждый из которых реализует  $n_i$ -й слой заданного  $ФОП_{ni}$ . Можно отметить, что каждый слоя  $ФОП_i$  формируется с  $ПКГ_{ini}$ , который выполняется заданной толщины  $h_{ini}$ . На рисунке 13 приведены следующие обозначения:  $\oplus$  - знак декомпозиции,  $\odot$  - знак бинарного соответствия,  $\otimes$  - знак композиции.

Можно отметить, что между структурами технологических процессов ОУО лопаток соседних номеров ступеней компрессора (рисунок 13) действуют связи параметров:

$$X_{r-1} = f(X_r), \quad (14)$$

где  $X_{r-1}$  – множество параметров технологического процесса ОУО лопаток  $(r-1)$ -го номера;

$X_r$  – множество параметров технологического процесса ОУО лопаток  $r$ -го номера.

Между параметрами ФОП лопаток компрессора также действуют связи:

$$Y_{r-1} = f(Y_r), \quad (15)$$

где  $Y_{r-1}$  – множество параметров ФОП лопаток  $(r-1)$ -го номера;

$Y_r$  – множество параметров ФОП лопаток  $r$ -го номера.

Здесь, следует отметить, что выражение (14) связывают между собой параметры отдельных технологических процессов ОУО лопаток. Подобные связи имеют место между всеми технологическими процессами комплексного связанного технологического процесса ОУО всех лопаток компрессора ГТД (рисунок 13). Также следует отметить, что между параметрами ФОП лопаток компрессора соседних ступеней также действуют связи, определяемыми выражением (15). На основании наличия этих связей предлагаемый комплексный технологический процесс является связным по параметрам технологии и по параметрам ФОП. При этом на основании этих связей реализуется принцип равенства ресурса всех лопаток компрессора.

На основании выражений (14) и (15), а также схемы рисунка 13, к основным параметрам связи технологических процессов можно отнести следующие [8]:

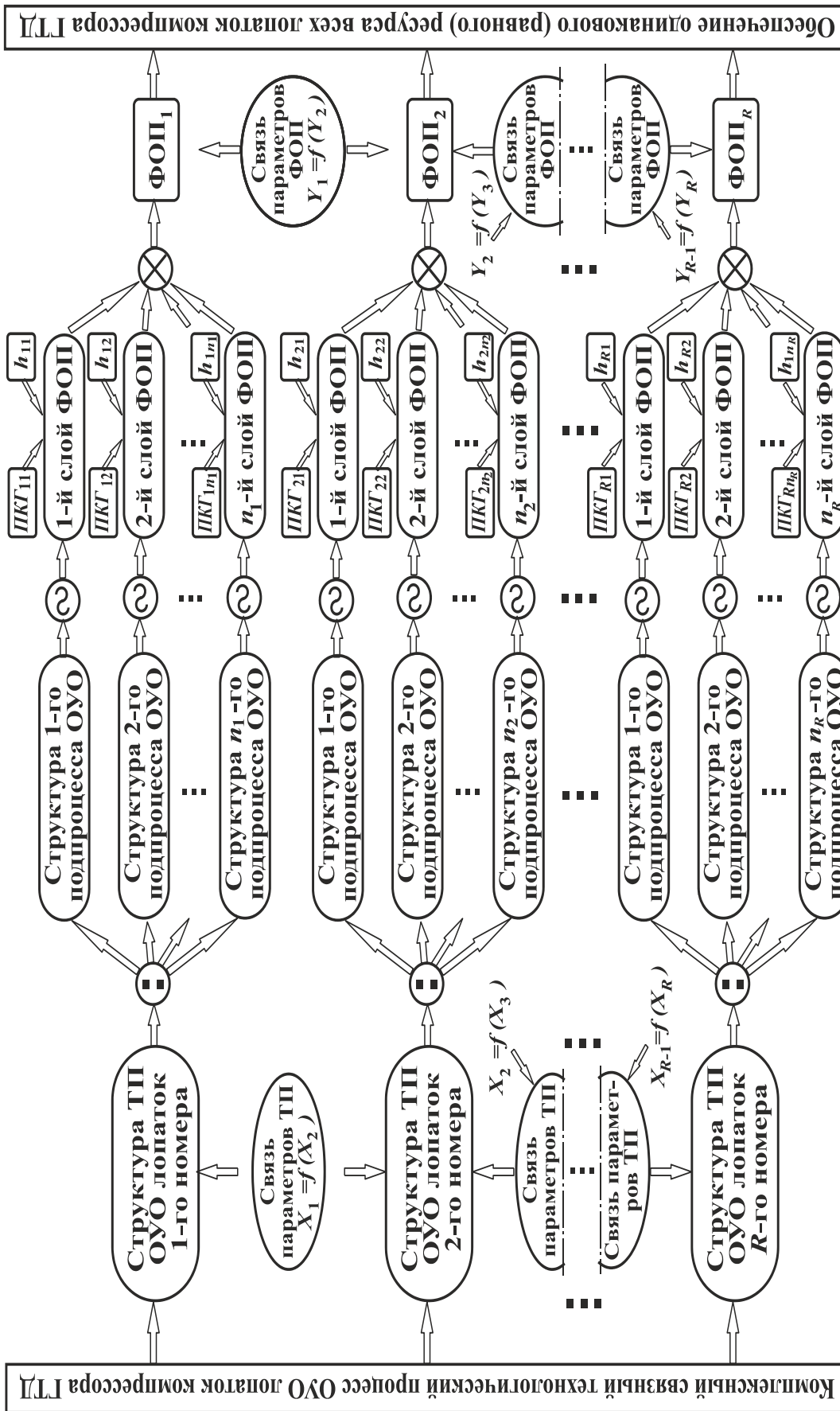


Рисунок 13. Схема синтеза комплексного связного технологического процесса ОУО лопаток с ФОП на базе принципа равенства ресурса всех лопаток ГТД

1. Обеспечение равного ресурса всех лопаток компрессора, работающих в условиях неравномерного износа, характеризуемого действия неравномерностей трех родов. Параметры интенсивности износа покрытия лопаток определяются параметрами, приведенными в работе [7].

2. Длительность напыления каждого слоя покрытия лопаток компрессора. Например, для лопаток компрессора ГТД модели ТВ3-117 (четырёхслойное покрытие), длительность напыления слоев покрытий для различных номеров лопаток приведена в таблице 5 и таблице 6.

3. Количество слоев многослойного ФОП лопаток компрессора. Эти данные определяются на основании выражения (13).

4. Толщина  $i$ -го слоя многослойного ФОП лопаток компрессора. Эти параметры с учетом связей определяются в соответствии с выражением (8).

5. При нанесении слоев ФОП устанавливается ток дугового испарителя в пределах 80 ... 140 А. При этом ток дугового испарителя для комплекта лопаток первых ступеней, например, рабочих лопаток компрессора двигателя модели

Можно отметить, что в выполненной работе представлены данной по конкретной экспериментальной реализации многосвязного технологического процесса формирования многослойного ФОП различных групп лопаток компрессора ГТД. ФОП и принцип равного ресурса всех лопаток компрессора позволяет решать вопросы повышения ресурса ГТД, адаптировать работу лопаток к особенностям их эксплуатации, обеспечить равный ресурс лопаток всех групп и повысить их ремонтпригодность.

## 5. Заключение

Таким образом, представленные в данной работе исследования направлены на повышение ресурса лопаток ГТД за счет комплексного формирования ФОС лопаток, обеспечения равного ресурса лопаток каждой группы и групп лопаток относительно друг друга, работающих в условиях действия неравномерных эксплуатационных функций. Это выполняется на основе разработки метода синтеза многосвязного технологического процесса реализации многослойных ФОП лопаток, образованных на базе установленных эксплуатационных, технологических и конструктивных связей.

Проведенные исследования позволили выполнить следующее:

1. Разработать принципы и особенности синтеза многослойного ФОП с ПКГ каждого слоя для каждой лопатки, для лопаток группы и групп лопаток относительно друг друга из условия равенства их ресурсов, а также повышения ресурса всех лопаток в ГТД.

2. Для решения вопросов повышения ресурса лопаток в ГТД в работе разработана методика реализации многосвязного технологического процесса формирования ФОП каждой лопатки, лопаток в группе и групп лопаток относительно друг друга, выполняемого на базе принципа равенства ресурсов всех лопаток при одновременном повышении ресурса ГТД.

3. В работе выполнена реализация технологического процесса формирования ФОП лопаток. При этом разработан алгоритм реализации ОУО лопаток с ФОП, представлено технологическое обеспечение формирования ФОП на базе вакуумных ионно-плазменных покрытий. А также представлена схема синтеза комплексного многосвязного технологического процесса ОУО лопаток с ФОП.

## ЛИТЕРАТУРА:

1. Ющенко, К. А. Інженерія поверхні. Підручник. / К.А. Ющенко, Ю.С. Борисов, В.Д. Кузнецов – К.: Наукова думка, 2007. – 558 с.
2. Физико-технологические основы методов обработки / Под ред. А. П. Бабищева. – Ростов н/Д: Феникс, 2006. – 409 с.
3. Абраимов, Н. В. Химико-термическая обработка жаропрочных сталей и сплавов / Н.В. Абраимов, Ю.С. Елисеев – М.: Интермет Инжиниринг, 2001. – 622 с.
4. Демин, Ф. И. Технология изготовления основных деталей газотурбинных двигателей / Ф. И. Демин, Н. Д. Проничев, И. Л. Шитарев. – М.: Машиностроение, 2002. – 328 с.
5. Полетаев, В. А. Технология автоматизированного производства лопаток газотурбинных двигателей / В.А. Политаев – М.: Машиностроение, 2006. – 256 с.
6. Богуслаев, В. А. Отделочно-упрочняющая обработка деталей ГТД. / В. А. Богуслаев, В. К. Яценко, П. Д. Жеманюк и [др.]. – Запорожье: Мотор Сич, 2005. – 559 с.
7. Михайлов, А. Н. Основы синтеза функционально-ориентированных технологий машиностроения / А. Н. Михайлов – Донецк: ДонНТУ, 2009. – 346 с.
8. Михайлов, В. А. Совершенствование структурного и технологического обеспечения изготовления лопаток компрессора вертолетных газотурбинных двигателей на основе связанных технологий: автореферат дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08 / В. А. Михайлов. – Донецк: ДонНТУ, 2019. – 18 с.
9. Михайлов, Д. А. Общий подход в обеспечении функционально-ориентированных свойств лопаток компрессора ГТД на базе принципа одновременного полного износа покрытия / Д. А. Михайлов, А. В. Хандожко, Е. А. Шейко, А. Н. Михайлов // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научных трудов. – Донецк: ДонНТУ, 2015. – Вып. 4 (50). – С. 132 - 139.
10. Патент № 2718877 RU, C23C 14/04. Способ нанесения функционально-ориентированного износостойкого покрытия на лопатку газотурбинного двигателя / А. Н. Михайлов, Д. А. Михайлов, В. А. Михайлов, Е. А. Шейко, А. П. Пичко, Н. С. Пичко, В. И. Сухарев; заявл. 2018107164 от 26.02.2018; опубл. 15.04.2020, Бюл. № 11. – 7 с.
11. Михайлов, А. Н. Структурный синтез комплексного многосвязного технологического процесса обработки лопаток компрессора газотурбинных двигателей с функционально-ориентированными покрытиями/ А. Н. Михайлов, Д. А. Михайлов, Е. А. Шейко, В. А. Михайлов // Научно-технические технологии в машиностроении. – Брянск: БГТУ, 2020. – № 1 (103). – С. 40-48. – <https://doi.org/10.30987/2223-4608-2020-2020-1-40-48>
12. Михайлов, Д. А. Особенности структурирования многослойных функционально-ориентированных покрытий лопаток газотурбинных двигателей / Д. А. Михайлов, В. А. Михайлов, Е. А. Шейко, А. Н. Михайлов // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научных трудов. – Донецк: ДонНТУ, 2020. – Вып. 2 (69). – С. 36 - 49.
13. Михайлов, Д. А. Особенности формирования параметров многослойных функционально-ориентированных покрытий лопаток газотурбинных двигателей / Д. А. Михайлов // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научных трудов. – Донецк: ДонНТУ, 2020. – Вып. 3 (70). – С. 42 - 54.

Поступила в редколлегию 29.04.2020 г.



УДК 621.22.01

**А. А. Олексюк**, д-р техн. наук, проф., **А. М. Гущин**, канд. техн. наук, ст. науч. сотр.,  
**Е. А. Бондарь**, канд. техн. наук, **А. А. Бондарь**  
ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры», ДНР  
ГОУ ВПО «Донецкий институт железнодорожного транспорта», ДНР  
ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет», ДНР  
Тел: +38 (071) 3792920; E-mail: helen.bondar@inbox.ru

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНЕЧНЫХ ТЕМПЕРАТУР ТЕПЛОНОСИТЕЛЕЙ РЕКУПЕРАТИВНОГО ТЕПЛООБМЕННИКА

*Рассмотрен расчет простейшего рекуперативного теплообменника, предложены расчетные зависимости для определения необходимых размеров теплообменника при известных начальных температурах греющего и нагреваемого теплоносителей и при заданных конечных температурах одного из теплоносителей. Решена обратная задача – определение конечных температур одного из теплоносителей при заданных начальных температурах теплоносителей и заданных размерах теплообменника.*

**Ключевые слова:** теплообменный аппарат, теплоноситель, температура.

**A. A. Oleksyuk, A. M. Gushchin, Y. A. Bondar, A. A. Bondar**

## DETERMINATION OF FINAL TEMPERATURES OF HEAT CARRIERS RECOVERABLE HEAT EXCHANGER

*The calculation of the simplest recuperative heat exchanger is considered, design dependencies are proposed for determining the necessary dimensions of the heat exchanger at known initial temperatures of the heating and heated fluids and at given final temperatures of one of the fluids. The inverse problem has been solved - determination of the final temperatures of one of the coolants at given initial temperatures of the coolants and given sizes of the heat exchanger.*

**Keywords:** heat exchanger, heat carrier, temperature.

### 1. Введение

Рекуперативные теплообменники используются в различных отраслях техники, в частности при охлаждении машин.

Известные методики расчета рекуперативных теплообменников имеют различные температурные граничные условия теплоносителей. [1- 9].

Так, в работе [1] для получения расчетной зависимости, связывающей температуры теплоносителей с площадью теплообмена, использовано в качестве математической модели процесса теплообмена уравнение теплового баланса в форме:

$$k \cdot \Delta t \cdot dF = m_2 \cdot c_2 \cdot d(\Delta t), \quad (1)$$

где  $k$  – коэффициент теплопередачи через разделяющую стенку от греющего к нагреваемому теплоносителю;

$\Delta t$  - разность температур греющего и нагреваемого теплоносителей;

$dF$  - элементарная площадка теплообмена;

$m_2$  - секундный массовый расход нагреваемого теплоносителя;

$c_2$  - удельная массовая теплоемкость нагреваемого теплоносителя;

$d(\Delta t)$  - изменение температурного напора между теплоносителями на участке  $dF$ .

Такое уравнение теплового баланса (1) справедливо для случая, когда температура греющего теплоносителя постоянна при движении его в теплообменнике.

Для случая, когда в теплообменнике изменяется температура обоих теплоносителей уравнение (1) использовать нельзя. Это вызывает необходимость получения новых зависимостей, отражающих реальные процессы теплообмена в теплообменнике.

## 2. Основное содержание и результаты работы

Для получения решений, отражающих реальные процессы в теплообменнике, использованы уравнения теплового баланса и расчетная схема простейшего противоточного рекуперативного теплообменного аппарата (рис.1).

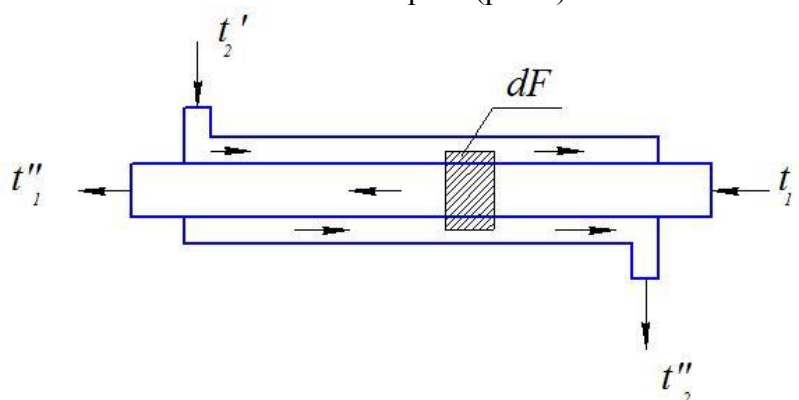


Рисунок 1. Расчетная схема противоточного рекуперативного теплообменника

- $t_1'$  - начальная температура горячего теплоносителя;
- $t_1''$  - конечная температура горячего теплоносителя;
- $t_2'$  - начальная температура нагреваемого теплоносителя;
- $t_2''$  - конечная температура нагреваемого теплоносителя.

За начало отсчета по длине теплообменника принята точка входа в теплообменник холодного теплоносителя и начало теплообмена его с горячим теплоносителем (рис. 1).

Выделим в теплообменнике элементарную площадку теплообмена  $dF$ . В пределах этой площадки будем считать, что вся теплота, использованная горячим теплоносителем, без потерь воспринимается холодным теплоносителем

$$dQ = m_1 \cdot c_1 \cdot dt_1 = m_2 \cdot c_2 \cdot dt_2, \tag{2}$$

где  $dQ$  - количество теплоты в пределах элементарной площадки  $dF$ ;

$m_1$  - секундный массовый расход горячего теплоносителя;

$c_1$  - удельная массовая теплоемкость горячего теплоносителя;

$dt_1$  - изменение температуры горячего теплоносителя;

$dt_2$  - изменение температуры нагреваемого теплоносителя.

С другой стороны, количество передаваемой теплоты через площадку  $dF$  выражается соотношением:

$$dQ = k(t_1 - t_2) \cdot dF, \tag{3}$$

где  $t_1$  - промежуточная температуры горячего теплоносителя;

$t_2$  - промежуточная температуры нагреваемого теплоносителя.

Уравнения (2) и (3) позволяют составить систему двух дифференциальных уравнений, решение которых позволит находить ответы для прямой и обратной задач в двухконтурном теплообменном аппарате.

### 3. Общий алгоритм и рекомендации

Из уравнений теплового баланса (2) и (3) составляем систему дифференциальных уравнений

$$\left. \begin{aligned} m_1 c_1 \cdot dt_1 &= k \cdot dF(t_1 - t_2) \\ m_2 c_2 \cdot dt_2 &= k \cdot dF(t_1 - t_2) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Систему уравнений (4) представим в другом виде

$$\left. \begin{aligned} dt_1 &= \frac{k \cdot dF}{m_1 c_1} (t_1 - t_2) \\ dt_2 &= \frac{k \cdot dF}{m_2 c_2} (t_1 - t_2) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Вычитанием уравнений в системе (5) получим

$$d(t_1 - t_2) = \left( \frac{1}{m_1 c_1} - \frac{1}{m_2 c_2} \right) k(t_1 - t_2) \cdot dF, \quad (6)$$

В уравнении (6) разность температур  $(t_1 - t_2)$  представим как новую переменную

$$\frac{d(t_1 - t_2)}{t_1 - t_2} = k \cdot \left( \frac{1}{m_1 c_1} - \frac{1}{m_2 c_2} \right) \cdot dF, \quad (7)$$

Уравнение (7) интегрируем в следующем виде

$$\ln \frac{t_1' - t_2''}{t_1'' - t_2'} = k \cdot \left( \frac{1}{m_1 c_1} - \frac{1}{m_2 c_2} \right) \cdot F, \quad (8)$$

Соотношение между температурами  $t_1'$ ,  $t_1''$ ,  $t_2'$  и  $t_2''$  в уравнении (8) не могут быть произвольными. Они зависят от  $m_1 \cdot c_1$  и  $m_2 \cdot c_2$ . Эту взаимосвязь можно установить с использованием уравнения (2), интегрируя его

$$m_1 \cdot c_1 \cdot (t_1' - t_1'') = m_2 \cdot c_2 \cdot (t_2'' - t_2') \quad (9)$$

Для совместного решения уравнений (8) и (9) одну из температур уравнения (9) подставим в уравнение (8). Если, например, из уравнения (9) находим температуру  $t_2''$

$$t_2'' = t_2' + \frac{m_1 c_1}{m_2 c_2} (t_1' - t_1''), \quad (10)$$

Соотношение (10) подставляем в уравнение (8). После некоторых алгебраических преобразований получим следующую зависимость

$$\ln \frac{t_1' (1-b) - t_2' + b \cdot t_1''}{t_1'' - t_2'} = \frac{k \cdot F}{m_1 c_1} (1-b), \quad (11)$$

$$\text{где } b = \frac{m_1 c_1}{m_2 c_2}, \quad (12)$$

**4. Цифровые модели.** Из уравнения (11) непосредственно определяется необходимая площадь  $F$ . Для определения отдельных температур при известной площади теплообмена к уравнению (11) необходимо применить правило потенцирования, согласно которому получим соотношение

$$\frac{t_1' (1-b) + b \cdot t_1'' - t_2'}{t_1'' - t_2'} = \exp \left[ \frac{kF}{m_1 c_1} (1-b) \right] \quad (13)$$

Из уравнения (12) можно определить одну из температур при известных двух других значениях температур. Однако, формулы (11) и (13) нельзя использовать при равенстве величин  $m_1 c_1 = m_2 c_2$ , то есть, когда  $b=1$ . Так, при определении величины  $F$  из уравнения (11) имеет место неопределенность вида  $\frac{0}{0}$ .

Для раскрытия этой неопределенности используем правило Лопиталья, согласно которому предел отношения их производных. Согласно этому правилу можно записать

$$\frac{\lim_{b \rightarrow 1} \ln \frac{t_1' (1-b) + b \cdot t_1'' - t_2'}{t_1'' - t_2'}}{(1-b)_{(b \rightarrow 1)}} = \frac{\lim_{b \rightarrow 1} \frac{d}{db} \ln \frac{t_1' (1-b) + b \cdot t_1'' - t_2'}{t_1'' - t_2'}}{\lim_{b \rightarrow 1} \frac{d}{db} (1-b)} \quad (14)$$

После определения производных в уравнении (14) и выполнения алгебраических преобразований получим соотношение

$$\frac{t_1' - t_2''}{t_1'' - t_2'} = \frac{kF}{mc} \quad (15)$$

Полученное уравнение (15) можно использовать для определения необходимой поверхности теплообмена  $F$  или одной из температур теплоносителей для случая, когда  $m_1 c_1 = m_2 c_2$ .

### 5. Заключение

В результате проведенных исследований получены расчетные зависимости для определения конечных температур холодного и горячего теплоносителей и необходи-

мой площади теплообменника при заданных начальных температурах и конечной температуре одного из теплоносителей.

1) Для простейшего противоточного теплообменника получены расчетные зависимости для определения конечных температур теплоносителей и требуемой поверхности теплообменника.

2) Показано, что нельзя задавать одновременно конечные температуры обоих теплоносителей, так как они функционально связаны.

3) Доказано, что полученные расчетные зависимости для определения конечных температур теплоносителей имеют ограничения по области их применения. В частности, при условии  $m_1c_1 = m_2c_2$  эти соотношения имеют неопределенность типа  $\frac{0}{0}$ .

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Теплотехника: учебник для вузов / А. П. Баскаков [и др.]; под ред. А. П. Баскакова. – 2-е изд, перераб. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 224 с.
2. Кудинов, В. И. Аналитические решения параболических и гиперболических уравнений тепломассопереноса [Текст]: учеб. пособие / В. И. Кудинов, В. А. Кудинов; под ред. Э. М. Карташова. – М.: ИНФРА-М, 2013. – 390 с.
3. Лыков, А. В. Тепломассообмен: Справочник / А. В. Лыков. – М.: Энергия, 1978. – 480 с.
4. Малов, Ю. И. Математическое моделирование процесса нестационарной теплопроводности в цилиндрическом тепловыделяющем элементе [Текст] / Ю.И. Малов, Т. А. Нужненко // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки. – 2003. – № 2. – С. 20–27.
5. Математическая модель нестационарного охлаждения газов в теплообменном аппарате / Ю. В. Александров [и др.] // Авиационные двигатели. – 2018. – № 1. – С. 49–53.
6. Алифанов, А. В. Двумерное стационарное температурное поле системы ограниченных разнородных цилиндров, находящихся в идеальном тепловом контакте [Текст] / А. В. Алифанов, В. М. Голуб // Инж.- физ. журн. – 2003. – Т. 76. – № 1. – С. 173–177.
7. Мельников, В. В. Нестационарный теплообмен в полем составном цилиндре / В. В. Мельников // Прикладная механика и техническая физика. – 2005. – Т. 46. – №2. – С. 31–33.
8. Дрейцер, Г. А. Исследование структуры турбулентных течений, теплообмена и гидродинамики в условиях гидродинамической нестационарности [Текст] / Г. А. Дрейцер, В. М. Краев // Изв. РАН. Энергетика. – 2006. – № 4. – С. 131–144.
9. Malakhova, T. V., Dynnikov Y. A. Investigation of the heat transfer from oscillating cylinder by the VVD method / T. V. Malakhova, Y. A. Dynnikov // Сборник тезисов докладов Международной научной школы молодых ученых и специалистов «Механика неоднородных жидкостей в полях внешних сил: Вихри и волны» – М.: 2011. – С. 32–32.

Поступила в редколлегию 13.05.2020 г.

УДК 681.518.5

**С. А. Паньчев**, соискатель, **А. И. Паньчев**, канд. техн. наук, доцент,  
**А. В. Максимов**, канд. техн. наук, доцент, **А. Г. Байбуз**, начальник учебной части  
Южный федеральный университет, Россия  
Тел.: +7(8634)371733; E-mail: aipanychev@sfedu.ru

## ПРИМЕНЕНИЕ ИНВАРИАНТНОГО ПОДХОДА В САМОДИАГНОСТИКЕ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ

*В статье описано применение инвариантного подхода к самодиагностике информационных каналов системы автоматизированного управления технологическими процессами на примере мониторинга распределенной системы управления. Приведена структура встроенной распределенной функциональной системы контроля и диагностики с аналитической избыточностью. Предложен мажоритарно-динамической метод реконфигурации распределенной системы управления, обеспечивающий контроль в реальном времени, безэталонную самодиагностику и локализацию отказавшего модуля за три этапа реконфигурирования.*

**Ключевые слова:** распределенная система управления, PCY, DCS, диагностика, инвариантный подход, реконфигурирование.

**S. A. Panychev, A. I. Panychev, A. V. Maksimov, A. G. Baybuz**

## INVARIANT APPROACH APPLICATION IN A DISTRIBUTED CONTROL SYSTEM SELF-DIAGNOSTICS

*The application of an invariant approach to information channels self-diagnostics of automated process control system on the example of monitoring a distributed control system is described. The structure of a built-in distributed functional monitoring and diagnostics system with analytical redundancy is given. A majority-dynamic method of a distributed control system reconfiguration is proposed, which provides real-time monitoring, standardless diagnostics and the failed module localization in three stages of reconfiguration.*

**Keywords:** distributed control system, DCS, diagnostics, invariant approach, reconfiguration.

### 1. Введение

Автоматизированная система управления технологическими процессами (АСУ ТП) является основополагающим фактором автоматизации технологических процессов и производств в машиностроении и включает в себя большое число подсистем. Одна из важных функций информационной подсистемы АСУ ТП состоит в диагностике состояния технологического оборудования: определении факта и желательно причины его нештатной работы, вероятностном прогнозировании сбоев и отказов, оценки степени их опасности для дальнейшей эксплуатации оборудования [1, 2].

В настоящее время многие АСУ ТП строятся на основе распределенных систем управления (PCY, DCS – Distributed Control System). В общем случае под PCY понимают систему управления технологическим процессом, состоящую из устройств, которые разнесены в пространстве, независимы друг от друга и взаимодействуют между собой для выполнения общей задачи. Основными элементами PCY являются микропроцессорные устройства, обычно это программируемые логические контроллеры (ПЛК), и интеллектуальные модули ввода-вывода информации, что обеспечивает распределённую системы ввода-вывода и децентрализацию обработки данных [3].

Современные PCY представляют собой открытые модульные системы, состоящие из серийно выпускаемых компонентов, которые соответствуют

общепризнанным стандартам. Существуют две основные концепции организации РСУ: мультипроцессорная и мультикомпьютерная. В первом случае вычислительные средства РСУ используют оперативную и долговременную память совместно, что означает создание единого адресного пространства. Во втором случае каждый компьютер работает со своей памятью, при этом объединяющая контроллеры сеть имеет шинную или коммутируемую архитектуру. В гомогенных РСУ используется одна соединяющая компьютеры сеть с единой технологией, в гетерогенных распределенных системах реализуются несколько сетей, в общем случае различных технологий [4].

Таким образом, структура РСУ характеризуется такими свойствами, как магистральность, модульность, микропрограммируемость, регулярность и однородность элементов. Эти свойства обеспечивают распределение задач между параллельно работающими процессорами, повышенную устойчивость к отказам и сбоям, так как отказ одного из контроллеров не влияет на работоспособность других, достаточно простое наращивание и реконфигурирование системы, относительную простоту каждого из модулей системы.

Немаловажной характеристикой РСУ также является её максимальная приспособленность к самодиагностике, что обеспечивает не только отказоустойчивость самой АСУ ТП, но и повышает надежность и безопасность диагностируемого ею технологического оборудования.

## 2. Постановка задачи и анализ методов решения

С целью сокращения аппаратной, структурной, информационной, временной избыточности, обеспечивающих отказоустойчивость и повышающих надежность технологического оборудования, поставим задачу разработки структуры и алгоритма работы встроенной функциональной системы контроля и самодиагностики (СКД) среднего иерархического уровня АСУ ТП – гомогенной мультикомпьютерной распределенной системы управления.

Основанные на инвариантном подходе методы диагностирования информационных систем рассмотрены в [5]. Основное содержание теории инвариантов в отношении объекта диагностирования сводится к выявлению изменений его характеристик при ненормальном функционировании.

Выделяют три основных метода реализации инвариантного подхода:

- модель диагностируемого объекта;
- наблюдатель состояния;
- введение аналитической избыточности.

Использование модели диагностируемого объекта положено в основу таких методов, как контроль на основе дублирования и мажоритарный контроль.

Принципы инвариантного подхода с помощью модели-эталона и на основе избыточной аналитики поясняются логическими схемами на рис. 1.

Контроль с помощью физической эталонной модели (рис. 1, а) реализуется посредством физического дублирования, то есть введения аппаратной избыточности. Эталоном в данном случае является второй экземпляр диагностируемого объекта с такими же входными сигналами  $X$ . В данном случае инвариант  $\Delta$  определяется суммой по модулю 2 измеряемых выходных сигналов основного  $Y$  и дублирующего  $Z$  объекта:  $\Delta = Y \oplus Z$ . Критерием отсутствия неисправностей или вычислительных ошибок в диагностируемом объекте является равенство инварианта нулю:  $\Delta = 0$ . Основанные на этом принципе функциональные СКД универсальны, просты в настройке и эксплуатации, не сопряжены с большими вычислительными затратами.

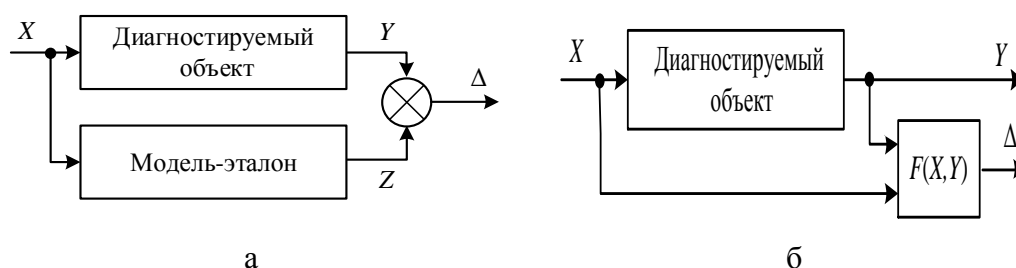


Рисунок 1. Принципы инвариантного подхода к диагностике:

а – с помощью эталонной модели; б – на основе аналитической избыточности

Для уменьшения аппаратной избыточности в качестве эталона используют математическую модель диагностируемого объекта  $F(X,Y)$ , вводя тем самым аналитическую избыточность (рис. 1, б). Однако на практике трудно установить аналитическую зависимость между измеряемыми входными сигналами  $X$  и выходными сигналами  $Y$  диагностируемой системы, что является причиной неустойчивости и ошибочности результатов контроля посредством аналитической модели.

Метод диагностики посредством дублирования будет эффективен, если РСУ реализована на принципах однородности, регулярности и магистральности на основе перепрограммируемых типовых модулей. Кроме того, архитектура РСУ должна быть наделена свойством реконfigurирования с целью маскирования некорректно реализуемых функций для обеспечения её живучести.

Следует отметить, что использовать инвариантный подход при диагностике на основе математической модели всей АСУ ТП, состоящей из множества подсистем, затруднительно или зачастую даже невозможно ввиду существенной сложности её модели. Вместо этого для обнаружения неисправностей целесообразно применять модели частей АСУ ТП. Дело в том, что централизованная диагностика сталкивается с нехваткой времени для проведения измерений и выполнения вычислений. Но главная проблема – это невозможность создания модели АСУ ТП из-за отсутствия адекватного системного математического инструментария.

Реализация инвариантного подхода к диагностике заключается в создании пар «диагностируемый объект – его эталонный модуль». Поскольку СКД является распределенной по функциональной топологии РСУ, для её реализации необходимы [6-9]:

- коммутационная среда;
- подсистема управления реконfigurацией по принципу инвариантного подхода;
- функциональные контрольные точки;
- контроллеры прерывания;
- блок принятия решения перехода от функции контроля к функции диагностики;
- блоки адресов отказавших пар «диагностируемый модуль – эталонный модуль».

### 3. Разработка структуры СКД и алгоритма самодиагностики РСУ

В [10-15] изложены основные положения синтеза реконfigurлируемых систем функционального контроля и диагностики бортового радиоэлектронного оборудования, в частности бортовых вычислительных систем, архитектура которых во многом аналогична структуре среднего иерархического уровня РСУ, объединяющего ПЛК и модули ввода-вывода информации.



Адаптируем полученные в указанных работах результаты к задаче самодиагностики состояния распределенных АСУ ТП. Полагаем, что РСУ представляет собой систему  $N$  архитектурно объединенных магистралью однородных микропроцессорных модулей.

Ввиду однородности всех модулей РСУ мониторинг её состояния можно обеспечить посредством введения в дерево функций системы дополнительной функции контроля и диагностики. Функция мониторинга реализуется встроенной распределенной функциональной СКД, работа которой основана на реконфигурации архитектуры РСУ.

Возможный вариант обобщенной структуры такой системы контроля и самодиагностики РСУ приведена рис. 2. Однородные модули  $1, 2, \dots, N$  выполняют основные функции РСУ, их функциональные связи на рисунке не показаны. Встроенная СКД может реализовать инвариантность мониторинга как на основе физического эталона в соответствии с рис. 1,а, так с использованием эталона в виде математической модели (рис. 1,б).

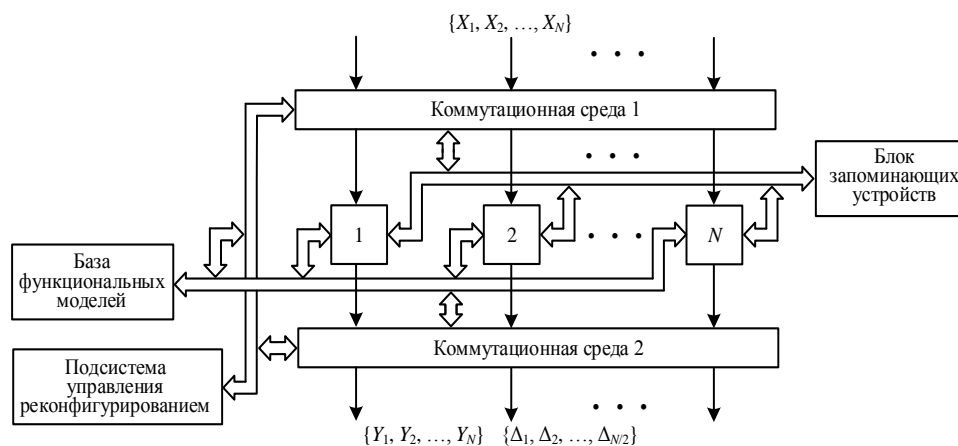


Рисунок 2. Структура встроенной распределенной функциональной СКД

Для этого в состав СКД включены:

- две коммутационные среды (КС1, КС2), обеспечивающие требуемую комбинацию соединений входов и выходов микропроцессоров;
- подсистема управления реконфигурированием (ПУР);
- база функциональных моделей  $F(X_i, Y_i)$  всех модулей,  $i = 1, \dots, N$  (БФМ);
- блок запоминающих устройств (БЗУ), предназначенный для временного хранения слова состояния модуля, используемого в качестве эталона в текущем сеансе диагностирования;
- магистраль диагностирования, обеспечивающая взаимодействие СКД с основной частью РСУ.

Этап контроля работоспособности ПЛК, позволяющий обнаружить наличие отказа в контроллерах РСУ, заключается в следующей процедуре реконфигурации структуры РСУ (рис. 3):

- по команде ПУР в КС1 входы соседних модулей объединяются попарно, в случае нечетного числа модулей необходимо предусмотреть ввод в архитектуру РСУ дополнительного (резервного) модуля;
- на объединенные входы каждой пары подается сигнал, присутствовавший в момент начала контроля на входе модуля с нечетным номером в паре;

- состояния модулей с четным номером в паре сохраняются в БЗУ;
- по команде ПУР в КС2 формируется вектор инвариантов  $\{\Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_{N/2}\} = \{Y_1 \oplus Y_2, Y_3 \oplus Y_4, \dots, Y_{N-1} \oplus Y_N\}$ , который сохраняется в БЗУ для использования на следующих этапах диагностики;
- индикатором наличия отказа в РСУ является дизъюнкция всех парциальных инвариантов  $\Delta_{det} = \bigvee_{j=1}^{N/2} \Delta_j$ .

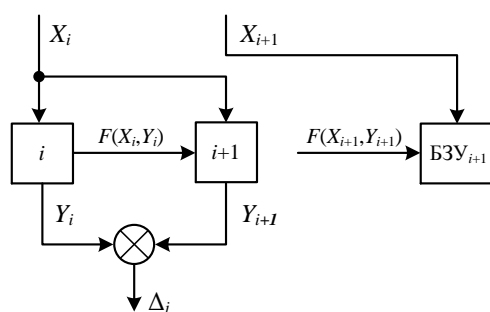


Рисунок 3. Фрагмент реконфигурированной структуры РСУ на этапе контроля

Если в результате выполнения данных процедур инвариант этапа обнаружения  $\Delta_{det} = 0$ , то все модули РСУ работоспособны, и структура системы возвращается к первоначальному виду. Если инвариант  $\Delta_{det} = 1$ , то по крайней мере один модуль РСУ неисправен.

Следующий этап самодиагностики – локализация отказа – на основе инвариантного подхода может быть выполнен несколькими методами, требующими различного времени для проведения процедуры самодиагностики:

- метод сканирующего контроля, максимальное число тактов для фиксации отказавшего элемента равно  $N$ ;
- метод дихотомии, число тактов анализа для выявления неисправного элемента составляет от  $\log_2 N$  до  $\log_2 N + 2$ ;
- метод Фибоначчи, число тактов локализации отказа не превышает  $\log_2 N$ ;
- метод «золотого сечения», число тактов локализации отказа не превышает  $\log_2 N$ .

Более эффективной является процедура локализации неисправного модуля, основанная на попарном сравнении работоспособности элементов РСУ. Для этого выполняется реконфигурирование РСУ из следующих соображений (рис. 4):

- по сохраненному в БЗУ вектору инвариантов этапа обнаружения неисправности по признаку  $\Delta_i = 1$  отыскивается  $i$ -я пара модулей, содержащая неисправный элемент;
- по команде ПУР в КС1 перегруппировываются  $(i-1)$ -я,  $i$ -я и  $(i+1)$ -я пары модулей, чтобы сравнить работоспособность отказавшей  $i$ -ой пары с граничными элементами из предыдущей и последующей пар;
- по команде ПУР на объединенные входы каждой вновь образованной пары подается входной сигнал модуля нечетным номером в паре;
- состояния модулей с четным номером в паре сохраняются в БЗУ;
- по команде ПУР все остальные модули, не участвующие в этом этапе диагностики, возвращаются в штатное рабочее состояние;

– по команде ПУР в КС2 на выходах двух образованных пар формируются инварианты  $\Delta_i = Y_i \oplus Y_{i-1}$ ,  $\Delta_{i+1} = Y_{i+1} \oplus Y_{i+2}$ .

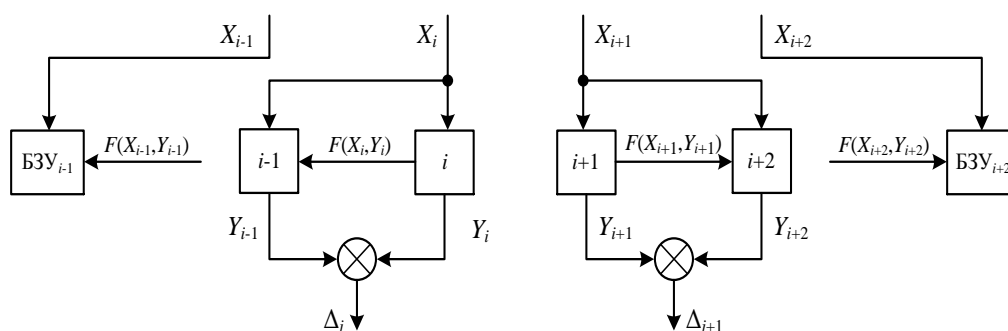


Рисунок 4. Фрагмент реконфигурированной структуры РСУ на этапе локализации отказавшего модуля

Если дизъюнктивный индикатор двух анализируемых пар  $\Delta_{loc} = \Delta_j \vee \Delta_{j+1} = 0$ , то это означает, что во время этапа обнаружения возник кратковременный сбой, отсутствующий на втором этапе диагностики. В этом случае структура РСУ возвращается в штатное состояние. Получение инварианта на этапе локализации неисправности  $\Delta_{loc} = 1$  означает, что в системе произошел отказ. Для локализации неисправного модуля анализируются парциальные инварианты  $\Delta_j$  и  $\Delta_{j+1}$  и определяется номер  $M$  пары с зафиксированным отказом  $\Delta_M = 1$ , при этом номер отказавшего модуля равен  $2M-1$ .

На заключительном этапе производится восстановление системы. С целью минимизации аппаратной избыточности в РСУ могут отсутствовать резервные элементы. Вследствие многофункциональности модулей функции отказавшего модуля с помощью адаптивного алгоритма могут быть перераспределяется между остальными работоспособными модулями. Вместе с этим, возможно замещение отказавшего модуля по методу скользящего резервирования.

Таким образом, предложенный алгоритм обнаружения отказа и локализации неисправного элемента осуществляется за три этапа реконфигурирования РСУ и не зависит от количества модулей  $N$ .

#### 4. Обсуждение результатов

Присущие современным РСУ свойства однородности, магистральности и многофункциональности позволяют реализовать систему функционального контроля и самодиагностики с заданным уровнем аппаратной или аналитической избыточности. Это достигается выбором того или иного алгоритма реконфигурации архитектуры РСУ в соответствии с инвариантным подходом, основанным на кратковременном дублировании однородных микропроцессорных модулей.

Работоспособность отдельных модулей РСУ оценивается по выходным сигналам пар элементов, выполняющих одинаковую информационную задачу. Если сформированный кодовый вектор инвариантов  $\{\Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_{N/2}\}$  не содержит единичных элементов, то РСУ признается работоспособным. При наличии единичных элементов осуществляется новая реконфигурация для образования новых пар с соседними работоспособными модулями.

Результатом выполнения мониторинга является определение адреса отказавшего модуля, удаление его из архитектуры РСУ, и замещение методом скользящего

резервирования или перераспределение функций отказавшего модуля между остальными, остающимися в работе.

Циклы мониторинга состояния РСУ могут начинаться по таймеру, в соответствии с прогнозируемым для модулей временем наработки до отказа. Другим вариантом начала цикла мониторинга может быть факт обнаружения перегрузки по одному из контролируемых физических каналов РСУ.

Встроенные СКД предназначены для идентификации отказа из реализуемого перечня функций и выполнения реконфигурации архитектуры для обеспечения её живучести. Модификации в системе могут происходить как через постоянные, так и через переменные промежутки времени. Они могут быть детерминированными или случайными, синхронными или асинхронными.

Структура РСУ должна изменяться, поскольку меняются функции: целевые, основные, выдвигаемые воздействием окружающей среды. Например, микроконтроллерные модули могут изменять свою архитектуру вследствие изменения трафика входных данных. Без учета входного потока задач можно говорить о временах использования системы по каждой функции и оценивать надежность с учетом времени выполнения системой всех её функций.

Основной сложностью в изучении многофункциональных систем является то, что исследование проводится без учета как потока входных задач, поступающих в систему, так и последствий отказов. Выходом из этой ситуации можно предложить разработку и исследование модели системы, позволяющей осуществить анализ потерь информации, вызванных маскированием функций, реализуемых типовыми модулями, реконфигурированием многофункциональной системы.

## 5. Выводы

В работе описан мажоритарно-динамический метод реконфигурации РСУ, основанный на инвариантном подходе к контролю и диагностике АСУ ТП. Предложенный алгоритм самодиагностики позволяет локализовать отказавший модуль за три такта реконфигурации без увеличения аппаратной, структурной, информационной, временной избыточности.

Рассмотренный подход реализуем при выполнении следующих требований к РСУ: архитектура системы отвечает условиям магистральности, модульности, микропрограммируемости, регулярности и однородности элементов; поступающие на обработку задания независимы, их поток является пуассоновским; выполняемые в системе задачи являются информационно однотипными; время выполнения заданий процессорами имеет экспоненциальное распределение; вероятность одновременного возникновения в нескольких контроллерах однотипных сбоев или отказов исчезающе мала. Вопросы усложнения алгоритма самодиагностики для случаев наличия нескольких отказавших модулей РСУ требуют дальнейшего исследования.

Предложенный вариант самодиагностики РСУ может стать одним из аппаратно-программных звеньев улучшения отказоустойчивости и повышения надежности технологического оборудования в машиностроении.

## ЛИТЕРАТУРА:

1. Емельянов, Д. С. Концепция создания интеллектуальной автоматизированной системы управления технической подготовки производства машиностроительного предприятия // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 4. – URL: <http://science-education.ru/ru/article/view?id=14253> (дата обращения: 15.06.2020).

2. Бурдо, Г. Б. Основные принципы создания систем автоматизации проектирования и управления в машиностроительных производственных системах / Г. Б. Бурдо, Н.А. Семенов // Программные продукты и системы. – 2019. – Т. 32. – № 1. – С. 134-140. – DOI: 10.15827/0236-235X.125.134-140, <https://www.bookasutp.ru/> [Электронный ресурс] (дата обращения: 15.06.2020).
3. Елизаров, И. А. Технические средства автоматизации / И. А. Елизаров, Ю.Ф. Мартемьянов, А. Г. Схиртладзе, С. В. Фролов // Программно-технические комплексы и контроллеры: учебное пособие. – М.: Издательство Машиностроение-1, 2004. – 180 с.
4. Сажин, С. Г. Методы диагностики информационно-измерительных каналов АСУТП. Инвариантный подход / С.Г. Сажин, В. П. Луконин, Н. А. Бахметова // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2008. – № 2. – С. 51-53.
5. Беззубов, В. Ф. Управляющая вычислительная система высокой надежности с реконфигурацией / В.Ф. Беззубов // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2010. – № 3. – Т. 8. – С. 46-60.
6. Щербаков, Н. С. Построение универсальной встроенной иерархической системы диагностирования сложных радиоэлектронных комплексов / Н. С. Щербаков, Т. Г. Самхарадзе, В. М. Рыбин // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2012. – № 4. – С. 46-50.
7. Агеев, А. М. Супервизорный метод управления технических систем с избыточностью / А. М. Агеев, А. М. Бронников, В. Н. Буков, И. Ф. Гамаюнов // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2017. – № 3. – С. 72-82.
8. Филиппов, А. К. Основы математического моделирования динамически реконфигурируемых систем обработки информации / А.К. Филиппов // Проектирование и технология электронных средств. – 2008. – № 1. – С. 38-44.
9. Гузик, В. Ф. Статистическая диагностика неравновесных объектов / В.Ф. Гузик, В. И. Кидалов, А. П. Самойленко. – СПб.: Судостроение, 2009. – 304 с.
10. Гузик, В. Ф. Комплексование аппаратно-программных средств контроля и диагностики бортового комплекса управления космического аппарата / В.Ф. Гузик, А. П. Самойленко, А. И. Панычев, С. А. Панычев // Инженерия для освоения космоса. Сборник научных трудов IV Всероссийского молодежного Форума с международным участием. – Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2016. – С. 150-153.
11. Panychev, S. A., Guzik V. F., Samoilenko A. P., Panychev A. I. The prerequisites of forming a risk management system in the design of facilities space application // MATEC Web of Conferences 102, 01030 (2017) V International Forum for Young Scientists "Space Engineering". DOI: 10.1051/mateconf/201710201030/.
12. Guzik V. F., Samoilenko A. P., Panychev A. I., Panychev S. A. Reconfiguring of structure as self diagnosis tool of on-board computers // 15th East-West Design & Test Symposium (EWDTS), 2017 IEEE. DOI: 10.1109/EWDTS.2017.8110106.
13. Samoilenko, A. P., Panychev A. I., Maksimov A. V., Baibuz A. G. Invariant Approach in Monitoring Condition of Onboard Radio Electronic Equipment // 2018 Global Smart Industry Conference (GloSIC). DOI: 10.1109/GloSIC.2018.8570133.
14. Самойленко, А. П. Синтез реконфигурируемых систем функционального контроля и диагностики бортового радиоэлектронного комплекса / А.П. Самойленко, С. А. Панычев, А. И. Панычев, О. А. Усенко, А. Г. Байбуз. – Ростов-на-Дону; Таганрог: Издательство Южного федерального университета, 2020. – 204 с.

Поступила в редколлегию 30.04.2020 г.

УДК 621.9.025

**Ю. П. Ракунов**, канд. техн. наук, доц., **В. В. Абрамов**, д-р техн. наук, проф.,  
**А. Ю. Ракунов**, инженер

НИУ Московский государственный строительный университет, Россия

Телефон: +7 (916) 8107126; E-mail: [Rakunov1991@mail.ru](mailto:Rakunov1991@mail.ru);

## ЗАКОНОМЕРНЫЕ СООТНОШЕНИЯ ЗНАКОВЫХ СКОРОСТЕЙ РЕЗАНИЯ ТОКАРНОЙ ГРУППОВОЙ ОБРАБОТКИ

*В статье рассмотрены научно-технические подходы к проблеме определения скорости резания при механической групповой обработке внутренних и наружных поверхностей деталей машин и приборов. Произведено сравнение двух основных моделей расчета и определения экономической скорости резания и стойкости инструмента при известных технологических условиях обработки на токарных универсальных и станках с ЧПУ. Разобраны методы оптимизации режимов резания и стойкости инструмента, основанного на теории А. Д. Макарова. Разобраны методические ошибки некоторых исследователей по произвольному назначению «экономической» скорости и стойкости инструмента, основанного на формулах Ф. Тейлора и на экономическом подходе к их расчёту. Показано, что использование закона постоянства оптимальной температуры резания обеспечивает максимальную стойкость инструмента, наивысшую точность обработки при оптимальной скорости резания для конструкционных сталей, сплавов и труднообрабатываемых материалов.*

**Ключевые слова:** условия резания, экономическая скорость резания, оптимальная температура резания, интенсивность износа, максимальная и экономическая стойкость инструмента, адаптивное управление.

**Yu. P. Rakunov, V.V. Abramov, A.Yu. Rakunov**

## REGULARITIES RELATIONSHIPS OF SIGNIFICANT CUTTING SPEEDS OF TURNING GROUP PROCESSING.

*The article considers the scientific and technical approaches to the problem of determining the cutting speed during mechanical group processing of the internal and external surfaces of machine parts and devices. A comparison is made of two basic models for calculating and determining the economic speed of cutting resistance under known technological processing conditions on universal turning and CNC machines. Methods of optimization of cutting conditions and tool life based on the theory of A. D. Makarov are analyzed. The methodological errors of some researchers on the arbitrary purpose of the "economic" speed and durability of an instrument based on F. Taylor's formulas and on the economic approach to their calculation are analyzed. It is shown that the use of the law of constancy of the optimum cutting temperature ensures the maximum durability of any tool, the highest machining accuracy at the optimal cutting speed for structural steels, alloys and hard-to-process materials, including high-strength steels, heat-resistant and titanium alloys.*

**Keywords:** cutting conditions, economic cutting speed, optimum cutting temperature, wear rate, maximum and economic tool life, adaptive control.

### 1. Введение

Резание – комплексное явление, соединяющее в себе способ резания, объект воздействия (заготовку), станок и режущий инструмент (РИ). Основная доля затрат на обработку резанием обратно пропорциональна размерной стойкости РИ. Известно, что большинство факторов, влияющих на интенсивность износа РИ: отношение контактных твёрдостей, диффузия и адгезия, окислительные процессы, пластическое течение поверхностных слоёв инструмента, изменение свойств обрабатываемого металла в контактных зонах и др., является функцией коэффициентов трения и температуры контактных поверхностей режущего клина в зоне стружкообразования [1-5].

Наиболее резкое изменение физических свойств обрабатываемых металлов и сплавов происходит при критических температурах структурно-фазовых превращений. При этих температурах наблюдается резкое уменьшение коэффициента диффузии хро-

ма, кобальта и вольфрама в железо и сталь [2-4]. Сопоставление значений  $\theta_0$  с температурами точек АС<sub>3</sub> для разных легированных сталей, высокопрочных и жаропрочных сплавов показало вполне удовлетворительное их совпадение.

Факт существования для каждой пары материалов: обрабатываемый (ОМ) – инструментальный (ИМ) оптимальной температуры  $\theta_0$  резания и её независимость от элементов режимов резания (РР), геометрии РИ, в том числе унифицированного (УРИ) с режущими элементами (РЭ) из различных ИМ, даёт ряд следующих преимуществ в условиях автоматизированного группового производства [5-7].

Работа на **оптимальной скорости резания  $V_O$**  обеспечивает:

- наименьшую интенсивность износа РИ (УРИ) и наибольшую его размерную стойкость, что приводит к достижению наивысшей точности обработки и повышению надёжности обеспечения заданного качества обработки;
- минимум шероховатости обработанной поверхности, количества дислокаций и других физико-механических показателей. Это объясняется тем, что при  $\theta_0$  у сталей, жаропрочных и титановых сплавов возникает эффект «провала пластичности» [2-4, 8];
- повышенные эксплуатационные свойства деталей: длительную и усталостную прочность, коррозионную стойкость, износостойкость, жаропрочность, контактную жёсткость по сравнению с поверхностями, обработанными на  $V$ , отличных от  $V_O$ ;
- использование рекомендаций по режимам оптимального резания (РОР) металлов существенно повышает производительность групповой обработки различных деталей.

Оптимальные по минимуму интенсивности относительного поверхностного износа  $h_{оп}$  РИ являются РОР по усилиям и мощности резания, по форме и характеру схода стружки, обеспечивают максимальный период стойкости РИ –  $T_O$ , мин. [2, 4].

## 2. Основное содержание и результаты работы

Использование оптимальной скорости резания  $V_O$  исключает случаи технической неграмотной эксплуатации РИ, когда в погоне за высокой  $T$ , мин, на производстве в ряде случаев используют явно заниженные скорости резания  $V_T$  (табл. 1) [1-3].

Таблица 1. – Эффективность оптимального резания (повышение размерной стойкости УРИ, технологической производительности и снижение себестоимости обработки при работе на  $V_O$  по сравнению с нормативными скоростями  $V_T$ , соответствующими стойкости  $T$ )

Пара материалов		Период стойкости $T_O$ , мин, соответствующий $V_O$	Вид обработки	$t$ , мм	$S$ , мм/об	$V_O$ , м/мин	$\frac{l_O}{l_T}$	$\frac{V_O}{V_T}$	$\frac{A_T}{A_O}$
Детали; заготовки	Резца; РЭ УРИ								
Э 20		<b>240</b>	Растачивание, точение	0,50	0,21	<b>490</b>	1,71	1,74	1,76
		<b>120</b>				<b>380</b>	1,22	1,17	1,19
45	Т15К6	<b>230</b>	Точение	1,0	0,20	<b>280</b>	2,33	1,73	1,82
40Х		<b>200</b>	наружное		0,20	<b>215</b>	2,55	1,90	1,99
40ХНМА		<b>240</b>	получистовое		0,30	<b>153</b>	1,32	1,24	1,26
4Х12Н8Т8МФБ		<b>90</b>			0,21	<b>115</b>	2,28	2,13	2,24

11X11H2B2MФ .15X18H12C4TЮ	ВК6М	<b>100</b> <b>75</b>	Точение наружное	2,0 1,0	0,43 0,47	<b>108</b> <b>78</b>	2,5 3,34	2,58 1,61	2,56 2,54
12X18H10T	ВК8	<b>30</b>	Нарезание резьбы	0,2/0,1	1,5	<b>70</b>	2,0	1,55	1,85
40X	P18	<b>240</b>	Зубофрезеро- вание	$m = 2$	2,5	<b>27</b>	1,15	1,60	1,46

К сожалению, в погоне за производительностью часто жертвуют стойкостью РИ, назначая завышенную  $V_T$ , соответствующую по устаревшей формуле Ф. Тейлора, выбранному периоду стойкости  $T$ , мин [8-10]. При этом повышение  $V_T$  на 50...55% приводит к резкому снижению  $T$  в 4...5 раз, что недопустимо, как по причине низкого качества обработки, так и высокой инструментоёмкости процесса, частоты смены и наладки РИ, что нарушает работу станков с ЧПУ в режиме «настройки и коррекции размеров» обрабатываемых поверхностей при автоматическом управлении процессом индивидуальной и групповой оптимизации обработки прецизионных деталей [6-14].

Работа на скорости резания  $V_T < V_0$  при достаточно высокой стойкости  $T$  экономически невыгодна не только из-за низкой производительности и высокой стоимости обработки, но и повышенного расхода РИ и УРИ [2-5,7,11-13].

Обработка современных высокотоксичных и пиррофорных сплавов на  $V_0$  является наиболее предпочтительной по условиям техники безопасности процесса и качества групповой обработки на станках с ЧПУ и обрабатывающих центрах (ОЦ) [2-4].

Использованное  $V_0$  даёт объективную сравнительную оценку обрабатываемости резанием конструкционных ОМ и режущих свойств ИМ [2,4,5-8]. Оценка режущих свойств по скорости резания  $V_T$ , соответствующей  $T$  (мин), обычно приводит к противоречивым результатам (см. табл. 2).

Таблица 2. Сравнение режущих свойств унифицированных твердосплавных резцов с РЭ из ВК6, ВК6М, ВК6ОМ и Т14К8 при чистовом точении ( $t = 0,5$  мм,  $S = 0,15$  мм/об) стали 12X18H9T по уровню скоростей резания  $V_T$  при разных выбранных значениях  $T$

$T$ , мин	$V_T$ , м/мин		Отношение	$\frac{V_{V_T(ВК6/ВК6М/ВК6ОМ)}}{V_{V_T(Т14К8)}}$
	ВК6/ВК6М/ВК6ОМ	Т14К8		
40	115 / 128 / 148	205		0,56 / 0,62 / 0,72
49	106 / 117 / 130	$V_0=130$		0,80 / 0,88 / 1,00
55	100 / 110 / 122	100		1,00 / 1,10 / 1,22
70	92 / 99 / 109	57		1,61 / 1,74 / 1,91
90	83 / 91 / 99	34		2,44 / 3,05 / 3,82
$T_0 = 145$	$V_0 = 69 / 71 / 73$	—		—

Взаимовлияние  $V$  и  $T$ , к сожалению до сих пор, принято в литературе выражать формулами Ф. Тейлора степенного вида (аппроксимация ниспадающей гиперболой):

$$V = C / T^m$$

Такие формулы справедливы лишь для узкого диапазона  $V$ , при этом  $m \neq const$ . При изменении  $V$  в широком диапазоне для различных процессов и материалов обра-



ботки резанием РИ из быстрорежущих порошковых сталей и твердых сплавов зависимость длины пути резания  $L$  и объема стружки  $Q$  от скорости  $\{L = V \cdot T = f(V)\}$  носит экстремальный характер и нередко с двумя экстремумами (см. рис. 1) [2-8].

Положение точек максимума на кривых  $L = f(V)$  зависит от физико-механических свойств материалов заготовки и инструмента, сечения среза и других условий резания (охлаждения). При повышении режущих свойств инструментальных материалов (ИМ) наблюдается повышение скоростей  $V_0$ , соответствующих максимуму  $L$  или минимуму интенсивности относительного поверхностного износа  $h_{оп}$  РИ.

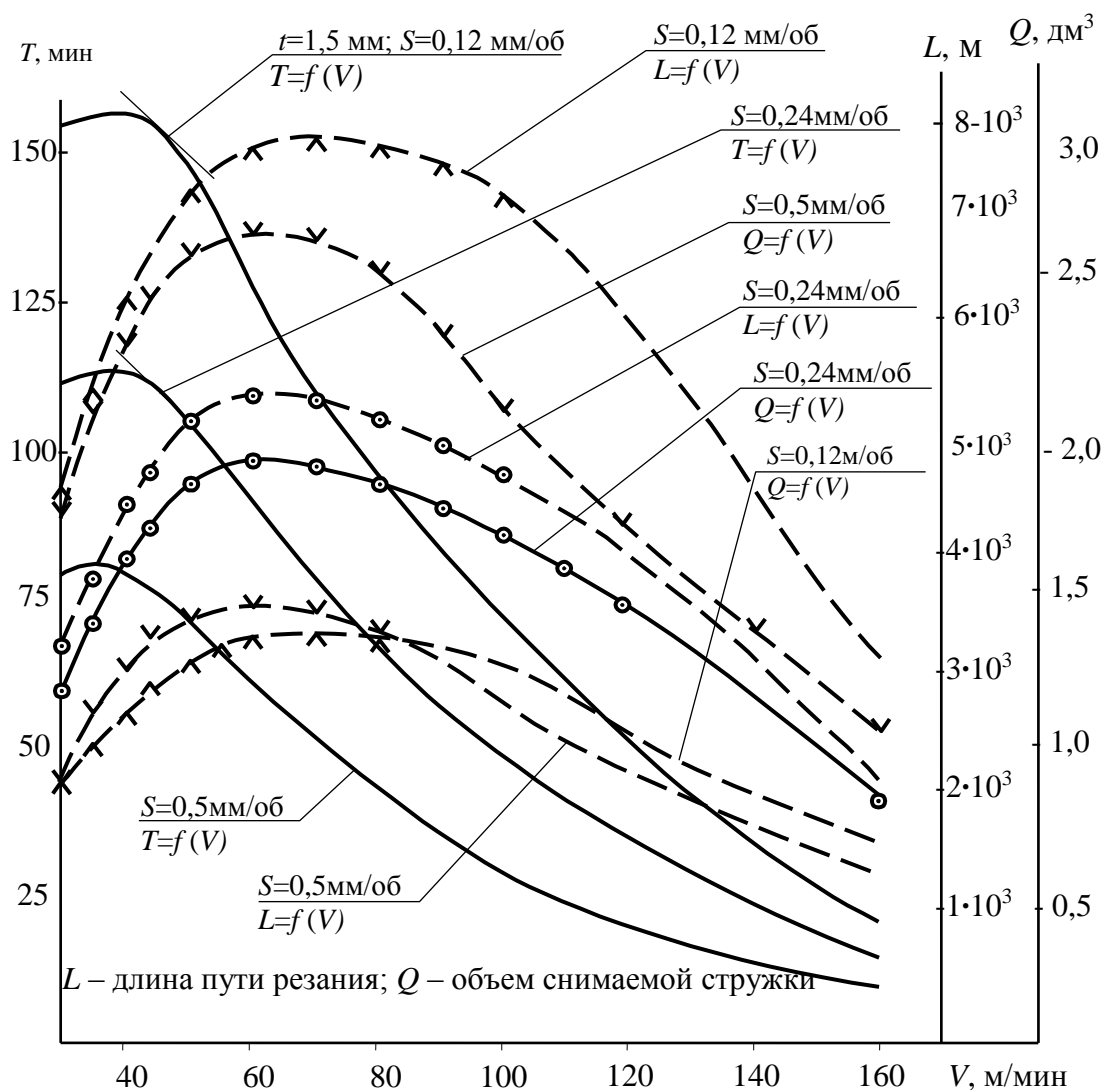


Рисунок 1. Параметры лучистой токарной обработки – продольное точение при  $t=1,5 \text{ мм}; S=0,12...0,5 \text{ мм/об}$  заготовки диаметром в диапазоне 30 - 100 мм из стали 60 резами с механическим креплением СМП из твердого сплава КНТ16 на станке с ЧПУ ТПК-125В.

Оптимальная  $V_0$  при обработке различных материалов колеблется в пределах от 10...30 м/мин для закаленных сталей и жаропрочных сплавов РИ из твердых сплавов до 300...450 м/мин при обработке заготовок из углеродистых сталей резами из минера-

локерамики. При экстремальности зависимостей размерной стойкости РИ от  $V$  зависимость  $T = f(V)$  может быть и экстремальной и монотонно убывающей [2]. Максимумы размерной стойкости РИ и общей  $L$  наблюдаются при различных  $V$  и  $S$ , а, следовательно, и температурах в зоне резания (рис. 1).

Для определения  $V_0$ , соответствующей максимуму  $L$ , надо первую производную пути  $L$  от  $V$  приравнять нулю:

$$L = V \cdot T;$$

$$(L)_{V'} = T + (T)_{V'} V = 0, \text{ откуда:}$$

$$V = V_0 = -T / (T)_{V'}. \quad (1)$$

Так как  $V_0$  и  $T$  являются положительными величинами, то равенство (1) может наблюдаться лишь при отрицательном значении величины  $(T)_{V'}$ , что возможно только для ниспадающей кривой. Следовательно,  $V_0$  соответствует правой (ниспадающей) ветви кривой  $T = f(V)$ . Поэтому всегда справедливо неравенство:  $V_M < V_0 < V_Э$ , где  $V_M$  - скорость резания, соответствующая максимуму  $T_M$ .

Даже в тех случаях, когда период стойкости  $T_M$ , наблюдаемый при  $V_M$  выше  $T_0$ , наблюдаемого при  $V_0$ , работа на скорости  $V_M$  является нерациональной, так как это приводит к снижению размерной стойкости  $L$ , производительности  $\Pi$  и ухудшению качества обработанной поверхности (см. рис. 2 и 3).

Оптимальные  $V_0$  достоверно могут быть выявлены на основе обычных стойкостных испытаний по кривым  $T = f(V)$ , при исследовании интенсивности размерного износа по кривым  $h_{ол} = f(V)$  и  $h_{оп} = f(V)$ , например, микрометрическим методом, позволяющим определить абсолютные величины относительного износа, которые необходимо знать при проектировании, наладке оборудования и расчете точности групповых технологических процессов, реализующихся на станках с ЧПУ и автоматических линиях [2-10, 14-18].

Оптимальная температура  $\theta_0$  (или термо-ЭДС) и поддержание её на постоянном уровне позволяет надёжно производить адаптивное управление процессом резания и автоматически поддерживать его на оптимальном уровне. Управление процессом резания при обработке деталей сложной формы (дисков турбин и компрессоров, гироскопов и др.) было успешно реализовано при групповой обработке деталей на двигателестроительных и приборостроительных заводах с большим экономическим эффектом [2-5].

Принципиальной методической ошибкой некоторых авторов является попытка назначения стойкости РИ как «нормативную» – путем произвольного выбора, например, из ряда: 15, 20, 30, 45, 60 или 90 минут [1, 8, 12]. Такой выбор противоречит многочисленным экспериментальным данным [2-7, 13, 14] (**практика – критерий истины**), а также сформулированной на основании исследований по теории проф. Макарова А.Д., который открыл и доказал закон оптимальной температуры  $\theta_0$  резания для различных методов обработки резанием конструкционных и труднообрабатываемых материалов [2, 4, 5-7].

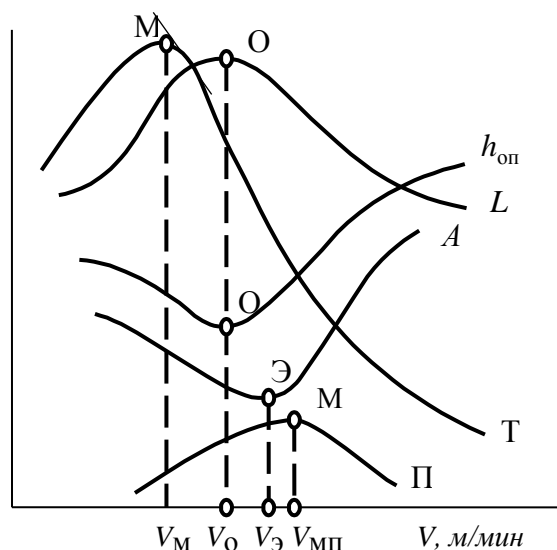


Рисунок 2. Схема влияния скорости резания на период стойкости  $T$ , путь резания  $L$ , интенсивность износа РИ  $h_{оп}$ , себестоимость  $A$  и технологическую производительность обработки  $\Pi$  (по Макарову А.Д.).

В действительности, оптимальная стойкость резания  $V_0$  определяется закономерностями механо-физико-химического контактного взаимодействия (ОМ) и (ИМ) материалов (см. табл.1), т.е. интенсивностью изнашивания в этой трибологической паре и допустимого **размерного износа**, который обычно регламентируется по старой привычке допустимым износом по задней грани  $[h_3]$ , который затруднительно определять, особенно в процессе контурной обработки на станках с ЧПУ [2-5, 14, 19-21].

Тем более ошибочным методом является общепринятый способ определения «экономической» стойкости  $T_Э$  [1, 3, 8, 12, 23] при наибольшей производительности станка на данном переходе (одним РИ) по формуле:

$$T_Э = (1/m - 1) t_{см}, \text{ мин.}, \tag{2}$$

где  $t_{см}$  – время на замену РИ после затупления и настройку станка [1-4, 8], т. е. как будто бы механо-физико-химические процессы в паре (ОМ-ИМ) напрямую зависят от конструкции РИ, его резцедержателя, точности прибора настройки РИ вне станка и квалификации наладчика станка с ЧПУ [9-15]. Кроме этого, следует учитывать, что время  $t_{см}$  в настоящее время на современных многоцелевых станках доводится до минимума (до 4...16 с «от реза до реза») при использовании автоматических механизмов смены РИ.  $T_Э$  в этом случае «экономическая» стойкость:

$$T_Э = (1/0,2 - 1) (4...16) = 16...64 \text{ с.}$$

Для универсальных токарных станков и станков с ЧПУ с ручной сменой РИ можно принять время  $t_{см} = 1...3$  мин (для поворота СМП или замены подготовленного вне станка УРИ):  $T_Э = (1/0,2 - 1) (1...3) = 4...12$  мин, что на порядок ниже, чем реальная стойкость РИ при обработке конструкционных сталей и тем более цветных сплавов. И только, если принять, что время смены изношенного РИ (паяного) включает в себя время на его ручную переточку или подточку  $t_{см}$  может составлять 10...15 мин. В этом случае:

$$T_{\Sigma} = (1/0,2 - 1) (10...15) = 40...60 \text{ мин.}$$

Проведенный анализ и расчёт показывает во сколько раз (на несколько порядков) отличается на практике  $T_{\Sigma}$ , определяемый в различных условиях эксплуатации универсальных, станков с ЧПУ и многоцелевых, а также фрезерно-расточных обрабатывающих центров. Использование формулы (1) категорически недопустимо для реальных условий токарной и других видов механической обработки.

Определение «экономическая стойкость» – стойкость, которая для заданных условий обработки обеспечивает наибольшую производительность и минимальную стоимость обработки [1] на переходе (при обработке одним РИ):

$$T_{\Sigma} = (1/m - 1) [t_{\text{см}} + (Q_{\text{T}} + Q_{\text{И}}) / E], \text{ мин,} \quad (3)$$

где:  $Q_{\text{T}}$  – затраты, связанные с работой РИ в течение одного периода стойкости;  $Q_{\text{И}}$  – затраты на переточку РИ;  $E$  – стоимость станкоминуты, руб.

Данная **формула также не выдерживает критики** в силу принципиальной независимости физической размерной стойкости РИ (УРИ) от времени  $t_{\text{см}}$ , а также непостоянства величины  $m$  ( $m = \text{var} = 0,15...0,42$ ) и противоречивости вклада «стоимости периода стойкости» в сам период стойкости РИ и УРИ. Таким образом нарушается причинно-следственная связь явлений, что недопустимо в науке, а тем более на практике.

Получается полная неопределенность с достоверным определением  $T_{\Sigma}$  и соответствующей ей  $V_{\Sigma}$  [1]. Таким образом,  $T_{\Sigma}$  не может быть рассчитана экономическим (бухгалтерским) методом.

На этой же странице указано, что «на станках с ЧПУ с автоматической сменой инструмента «экономическая» стойкость  $T_{\Sigma}$  может быть принята равной 15-20 мин, т. е. значительно меньшей, чем на станках с ручным управлением (когда  $T_{\Sigma}$  принимается в диапазоне 60...90 мин). Это позволяет форсировать режимы, т. е. скорость резания и получить на станках с ЧПУ большую производительность обработки», (качество при этом не гарантируется), причём за счет удорожания стоимости эксплуатации РИ, что выгодно только производителям и поставщикам (посредникам) дорогостоящего инструмента, например, иностранным фирмам, поставляющим неперетачиваемые пластины [12,19-22] для РИ с механическим креплением. Потребителю же это невыгодно, т. к. не только удорожает продукцию, но и выводит станки из строя по причине их недопустимого износа или уменьшения межремонтного цикла, что удорожает стоимость и без того дорогой станкоминуты станка с ЧПУ или обрабатывающего центра [1, 6, 8, 12].

При использовании импортных резцов с СМП (да и отечественных – тоже) на предприятиях ВПК (в частности, двигателестроительный НПЦ газотурбостроения «Салют», заводах ОКБ «Сухого», заводе им. Хруничева) в технологии механической обработки ответственных деталей летательных и космических аппаратов (ЛиКА) появилась запись **«режущую пластину сменить после одного прохода»** по обрабатываемой поверхности или **«принудительно сменить СМП после нескольких? минут работы»**, т. е. технологам приходится перестраховываться применяя РИ с СМП. Это положение возникает по причине отсутствия достоверной информации, которая должна предоставляться ведущими фирмами-производителями резцов с СМП, о характере износа и стойкости этих пластин при обработке различных конструкционных, жаропрочных, титановых и, особенно труднообрабатываемых, летающих материалов. Такое недопусти-

мое положение заставляет предприятия-потребители самим заниматься испытаниями тех СМП, которые во множестве распространены на рынке от различных производителей (вплоть до чешских, итальянских и китайских), не говоря уже о SANDVIK Coromant, ISCAR, KORLOY, MITSUBISHI, KENNAMETALL и многих других. Нежелание предоставлять результаты стойкостных испытаний СМП этих фирм легко объяснить – это им не выгодно. В тоже время, эти фирмы охотно предлагают предприятиям-потребителям самим испытать вновь разрабатываемые СМП на наших заводах в реальных производственных условиях, при условии предоставления результатов испытаний фирмам-производителям СМП. Таким образом за них делается ответственная работа и собирается статистический материал. На ведущих фирмах-поставщиках СМП для этого из сверхприбыли предусмотрены так называемые «представительские расходы», которые продвигают их продукцию на рынок. РФ в этом смысле свой рынок уже потеряла, или близка к такому состоянию. Т. о. наша страна попадает в техническую и технологическую зависимость от стран Запада [19-23].

Для сохранения независимости и отстаивания национальных интересов РФ необходимо развивать своё производство, не копирующее их «достижения», а реализующее отечественные разработки, в частности, унифицированный РИ и таблицы-матрицы режимов оптимального резания (РОР), разработанные в наукоёмкой первичной подсистеме многоуровневой базовой технологии, позволяющей эффективно реализовывать методы высокотехнологичной групповой технологии, повышая при этом стойкость УРИ в несколько раз (в 5-10 раз), гибкость производства, поднять его производительность и эффективность минимум в 2 раза. При этом будут загружены отечественные инструментальные заводы, созданы дополнительные рабочие места, повышена производительность труда на этих заводах при небольших капиталовложениях и внутренних инвестициях. Только таким образом можно осуществить *импортозамещение* и прорыв в ХХI век по качеству и производительности нашей оборонной и гражданской промышленности [5-7, 11, 13, 15].

По данным [2-5, 8, 13] «экономическая» стойкость  $T_{\Sigma}$  для различных РИ и пар материалов (ОМ-ИМ) может быть принята равной 30-360 мин (см. табл. 1 и 2) и для грамотного и точного определения  $T_{\Sigma}$  необходимо знать  $T_0$ , соответствующую  $V_0$ . Величина соотношения  $V_{\Sigma}/V_0 = 1,20 \dots 1,25$ , т. е. эти скорости находятся в пределах одной скоростной ступени универсального станка, а для труднообрабатываемых (жаропрочных, высокопрочных, коррозионностойких) ОМ они практически совпадают (см. рис. 3).

Факт существования оптимальных температур  $\theta_0$  и их инвариантность по отношению к виду обработки открыл возможность определения  $V_0$  для различных видов обработки (фрезерования, нарезания резьбы, протягивания, строгания и др.) лишь на основе температурных исследований и имеющихся данных  $V_0$  для какого-либо одного вида обработки, например, для точения. Реализация идей использования рекомендаций по РОР, установленным для какого-то одного вида обработки, и получения рекомендаций для других видов обработки резанием давно была целью исследователей [1-3, 5-8, 19-25]. Но эта задача оказалась чрезвычайно сложной и не могла быть решена путём использования традиционных методов (модель Ф. Тейлора, Колдинга и др.), а решается методами теории подобия Силина С. С. [3, 7, 8, 11-14]. Определение обрабатываемости при использовании скорости  $V_T$ , соответствующей реальному периоду стойкости  $T$ , исходя из равенства  $\theta_0$  для различных видов обработки (точения, строгания, торцового фрезерования и др.)  $V_0$  для любого вида обработки легко осуществить на основе кратковременных температурных исследований резания данным ТР УРИ [2-5, 7, 8, 13-15].

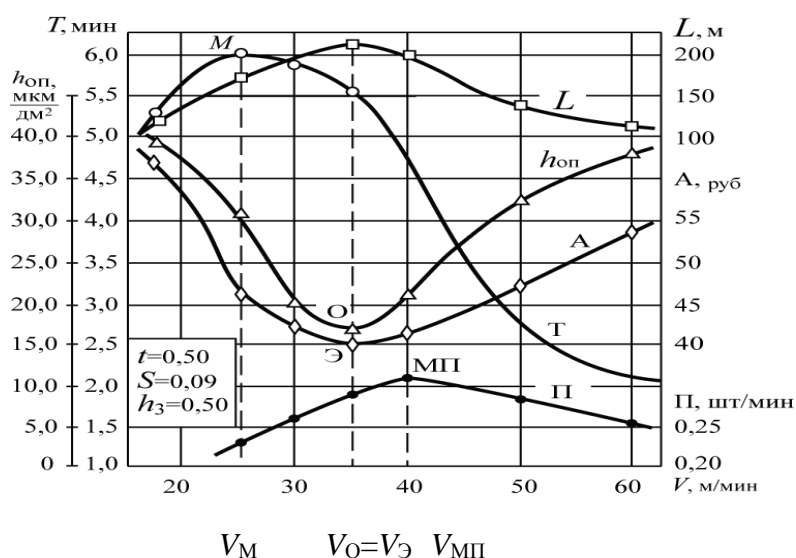


Рисунок 3. Влияние  $V$  на параметры процесса резания при точении жаропрочного сплава ХН60ВМТЮ (ЭП212) наружным унифицированным резцом с РЭ из т/с ВК60М [13].

Считается, что эффективная эксплуатация станков с ЧПУ возможна только с адаптивным управлением [2-5, 9-12]. И это, правильно, если нет квалифицированных инженеров-технологов и наладчиков станков. Хотя будущее, конечно, за адаптивным управлением, которому надо «научить» станки с ЧПУ, - это наукоёмкая задача направления развития *Индустрия 3.0*. Без решения задач *Индустрии 3.0* невозможно *развивать концепцию Индустрии 4.0* [15-21, 26]. Но и адаптивное управление процессом резания по одному критерию - произвольно выбранному значению термо-ЭДС (ТЭДС) может привести к плохим результатам, так как одному и тому же значению ТЭДС при различных комбинациях элементов РР:  $t$ ,  $S$ ,  $V$  могут соответствовать резко (до 5 раз) отличающиеся по величине периоды стойкости  $T$  РИ [2-5, 8, 13, 22-24].

**Для труднообрабатываемых материалов** (36НХТЮ, ХН77ТЮР, ХН60ВМТЮ, ХН67ВМТЮЛ, 38ХНЗМФА, ВТ14) скорости резания  $V_0$  обеспечивают и наименьшую себестоимость обработки, т. е. они являются экономически выгодными скоростями  $V_Э$ . Необходимо отметить, что, чем ниже (хуже) обрабатываемость металла резанием, тем более резко выражен экстремальный характер зависимости себестоимости обработки от скорости резания  $A = f(V)$ , тем ближе к единице величина отношения  $V_Э / V_0$  (см. рис. 3).

Оптимальные скорости резания  $V_0$ , будучи связанными через оптимальную температуру контакта  $\theta_0$  с механо – физико - химическими константами ОМ и ИМ, значительно легче поддаются экспериментальному и расчётному определению. Особенно эффективным оказалось совместное использование закона постоянства температуры  $\theta_0$  и математических методов планирования эксперимента [2-8, 24, 25].

### 3. Выводы

1. Работу на скорости  $V_M$  надо признать нерациональной, - здесь наблюдаются низкая производительность  $\Pi$  и пониженная размерная стойкость  $L$  (высокая  $h_{оп}$ ), себестоимость обработки  $A$  и расход РИ (УРИ) являются высокими.

2. При работе на скорости  $V_0$  достигается наивысшая размерная стойкость РИ, а его расход и погрешность обработки, связанные с износом РИ – минимальны.

3. Работа на скорости  $V_Э$  вместо  $V_0$  приводит к некоторому снижению себестоимости обработки и размерной стойкости РИ, а его расход возрастает.

4. Повышение скорости до  $V_{МП}$  приводит к незначительному повышению П на данном переходе (рабочем месте) за счёт резкого повышения  $h_{оп}$  (расхода РИ) и себестоимости изготовления деталей. Проведенные для различных ОМ расчёты  $V_Э$  показывают, что, как правило  $V_Э = (1,2 \dots 1,25) \cdot V_0$ , т. е. скорости  $V_0$  и  $V_Э$  находятся в пределах одной скоростной ступени универсального станка, а для труднообрабатываемых ОМ они практически совпадают (см. рис. 3). Это обстоятельство было ранее и является сейчас дополнительным стимулом для расширения исследований оптимизации конструкции УРИ, процессов резания и автоматизированного ведения обработки на режимах оптимального резания [15].

5. Рассмотренный закон и алгоритм определения РОР является логической и методической основой разработки подсистемы оптимизации и принятия технологических решений в системе многоуровневой базовой групповой технологии [2,5-7, 11, 13, 15].

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Звонцов, И. Ф. Разработка управляющих программ для станков с ЧПУ: учебное пособие. – 2-е изд., стер / Звонцов И.Ф., Иванов К. М., Серебренникий П. П. // Учебники для вузов. Специальная литература – СПб.: Издательство «Лань», 2018. – 588 с.

2. Макаров, А. Д. Оптимизация процессов резания / А. Д. Макаров. – М.: Машиностроение, 1976. – 278 с.

4. Силин, С. С. Методы подобия при резании металлов / С. С. Силин. – М.: Машиностроение, 1979. – 152 с.

5. Макаров, А. Д. Износ и стойкость режущих инструментов / А. Д. Макаров. – М.: Машиностроение, 1966. – 264 с.

6. Ракунов, Ю. П. Управление качеством токарной обработки высокоточных деталей машин / Ю. П. Ракунов // Научно-технические технологии в машиностроении. – № 2. – 2013. – С. 36-48.

7. Ракунов, Ю. П. Оптимизация синтеза инструментальных наладок для станков с ЧПУ / Ю.П. Ракунов // Журнал «Конструктор-машиностроитель». 2010. – № 3, 5.

8. Ракунов, Ю. П. Первичная подсистема многоуровневой базовой технологии / Ю. П. Ракунов // Научно-технические технологии в машиностроении. – № 3, 2012. – С. 23-31.

9. Ермаков, Ю. М. Выбор оптимальной скорости резания на основе стойкостной зависимости для режущего инструмента / Ю. М. Ермаков. – М.: ВНИИТЭМР, 1986. – 64 с.

10. Митрофанов, С. П. Групповая технология машиностроительного производства: в 2-х т.Т.1 / С.П. Митрофанов // Организация группового производства. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд. 1983. – 407 с.

11. Технология и организация группового машиностроительного производства: в 2-х ч. Ч.1 Основы технологической подготовки группового производства / С. П. Митрофанов, А. Г. Братухин, О. С. Сироткин и др. – М.: Машиностроение, 1992. – 480 с.

12. Ракунов, Ю.П. Разработка САПР оптимальных групповых процессов токарной обработки на станках с ЧПУ / Ю. П. Ракунов, В. В. Абрамов // Справочник, Инженерный журнал, приложение. – № 7, 2015. – С. 1-29.

13. Справочник технолога // Под ред. А. Г. Сулова. – М.: Машиностроение, 2019. – 678 с.
14. Ракунов, Ю. П. Роль скорости резания и радиуса округления режущего клина в эффективности тонкой механической обработки труднообрабатываемых материалов / Ю.П. Ракунов, В. В. Абрамов, А. Ю. Ракунов // Журнал «Станкоинструмент». – 2020. №1. – С. 66-72.
15. Копылов, Ю. Р. Компьютерные технологии в машиностроении (практикум + CD): учебное пособие / Ю. Р. Копылов. – Воронеж: Изд.-полиграф. центр «Научная книга», 2012. – 508 с.
16. Патент 2226453 РФ, Многократно перетачиваемый резец: / Ракунов Ю.П., Хрульков В. А., Золотова Н. А., Тихонов Н. А. – Бюл. № 10, 2004.
17. SURFCAM Velocity: автоматизированная подготовка управляющих программ многокоординатной обработки на станках с ЧПУ// САПР и графика. – 2005. – № 11.
18. Калачев, О. Н. Моделирование в CAD/CAM Cimatron механообработки на станках с ЧПУ/ О.Н. Калачев. – Ярославль: Ярославский государственный технический университет., 2013. – 30 с.
19. Основные направления развития систем программного управления в мире. [Электронный ресурс] – режим доступа: <http://www.mashcon.ru/article/21>.
20. Machining: fundamentals and recent advances / Ed. J. Paulo Davim. Springer, 2008. – 361 p.
21. Klocke F. Manufacturing Processes. Cutting. Springer, 2011. – 500 p.
22. Sandvik Coromant. Рекомендации по режимам резания. Токарная обработка. <http://www.coroguide.com/CuttingDataModule/CDMTurning.asp>. (дата обращения 24.12.2018).
23. Грубый, С. В. Оптимизация процесса механической обработки и управление режимными параметрами / С. В. Грубый. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. – 149 с.
24. Кугультинов, С. Д. Технология обработки конструкционных материалов: учебник для вузов / С. Д. Кугультинов, А. К. Ковальчук, И. И. Портнов. – Изд. 3-е, перераб. и доп. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана. 2010. – 678 с.
25. Старков, В. К. Физика и оптимизация резания металлов. – М.: Машиностроение, 2009. – 409 с.
26. Ермаков, Ю. М. Комплексные способы эффективной обработки резанием: Библиотека технолога. – М.: Машиностроение, 2003. – 272 с.
27. Шваб, К. Четвёртая промышленная революция / Пер. с англ. – М.: Эксмо, 2016. – 208 с.

Поступила в редколлегию 17.05.2020 г.



УДК 622.251

**С. Н. Царенко**, д-р. физ.-мат. наук, доц., **Ю. В. Петтик**, канд. техн. наук, доц.  
Камчатский государственный технический университет, Россия  
Донецкий национальный технический университет  
Тел./Факс: +38 (062) 312-37-95; E-mail: [tzarenko@gmail.com](mailto:tzarenko@gmail.com), [mr.pettik@yandex.ru](mailto:mr.pettik@yandex.ru)

## УСТОЙЧИВОСТЬ ОБСАДНОЙ ТРУБЫ, КАК ОБОЛОЧКИ РАБОТАЮЩЕЙ НА ВНЕШНЕЕ ДАВЛЕНИЕ

В статье приведено обоснование параметров стальной крепи, работающей при спуске на плаву на основании исследования напряженно-деформированного состояния и устойчивости обсадной трубы, как оболочки работающей на внешнее давление.

**Ключевые слова:** оболочка, внешнее давление, изгибная жесткость, напряженно-деформированное состояние, численные методы, запас прочности, критическая нагрузка, материалоемкость

S. N. Tsarenko, Yu. V. Pettik

### STABILITY OF THE CASING PIPE AS A SHELL WORKING ON EXTERNAL PRESSURE

Justification of parameters of the steel mountain support working during descent afloat on the basis of a research of the intense deformed state and stability of the casing pipe as support working for external pressure is given in article.

**Keywords:** casing shell, stability and stiffness of the casing pipe, external pressure, bending stiffness, stress-strain state, numerical methods, safety margin, critical load, material capacity

При строительстве шахт в качестве постоянной крепи стволов и скважин большего диаметра используется стальная крепь, в виде стальных обсадных труб с последующим тампонированием или цементацией.

В процессе возведения крепи в выработке, заполненной буровой жидкостью, горное давление на нее не действует, но в процессе спуска на плаву, тампонирования и особенно после откачки жидкости, оно значительно возрастает. Поэтому крепь должна быть прочной, а в стволах и скважинах, используемых для проветривания, спуска и подъема людей и материалов, еще и прямолинейной, неогнеопасной, водонепроницаемой.

Стальная крепь представляет собой кольцо, полученное после вальцовки на листогибочной машине листа толщиной 10 – 20 мм с последующим свариванием стыка. Для увеличения прочности на смятие, кольца оснащаются бандажами из листовой стали в виде полосы шириной 300 мм, толщиной 20 мм или из швеллеров № 12 – 18, которые располагаются снаружи на трубе через 750, 1000, 1500 мм (рис. 1).

Кольца диаметром до 2,8 м свариваются в трубу длиной 6 м и транспортируются на буровой участок. Кольца диаметром от 3,0 до 3,5 м перевозятся в вертикальном положении и стыкуются в колонну непосредственно на буровой. Крепь диаметром от 4,2 м до 6,0 м и более формируется из сегментов, поступающих с завода, путем сваривания

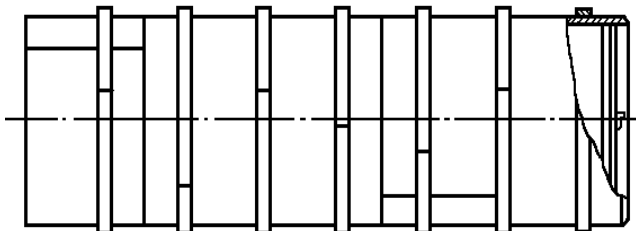


Рисунок 1. Конструкции обсадных труб с бандажами из швеллеров

их в специальном кондукторе станда для изготовления крепи на буровом участке.

Спуск обсадной колонны на плаву очень сложная практическая задача, так как ее успешная реализация зависит от ряда факторов, среди которых основными являются: точность составления расчетных моделей на стадии проектирования, а также качество изготовления и сборки обсадных труб. Существующие методы проектирования колонны [1-3] базируются на ее расчете, как многослойной оболочки, находящейся под действием внешнего давления. Такой подход не отражает в полной мере работу обсадных труб под действием нагрузок, которые в частности возникают при проведении монтажных работ.

Также следует отметить, что принятые расчетные схемы основаны на идеализированной конструкции оболочки. На практике трубы имеют несовершенство формы и неоднородную цилиндрическую жесткость, за счет наличия монтажных окон (рис. 2.), а также радиальных и осевых смещений между шпангоутами в сегментах труб при сборке и монтаже, (рис. 3). При этом длина секции составляет 30 – 32 м.

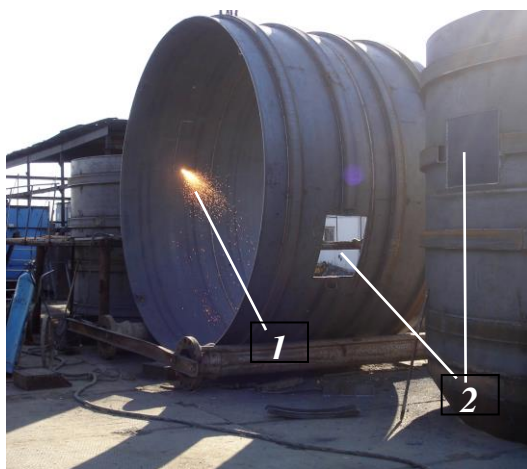


Рисунок 2. Прорезание монтажных окон в секции обсадной трубы:

1 – вырезка монтажного окна;

2 – вырезанные окна



Рисунок 3. Монтаж колонны труб на устье скважины

Не имея теоретических обоснований для учета влияния указанных выше дефектов формы и структуры, на стадии проектирования колонны закладывают завышенные коэффициенты запаса, что в свою очередь приводит не только к увеличению материалоемкости конструкции и соответственно ее стоимости, но и к увеличению монтажных нагрузок.

Для расчета длинных оболочек на устойчивость распространена модель кругового кольца [4-6]. В работе [4] рассмотрена задача устойчивости круговой арки, шарнирно-опертой по краям под действием равномерно-распределенного давления. В работе [5] исследован вопрос устойчивости круговых колец при воздействии различного вида симметричных нагрузок. Некоторые случаи устойчивости составных колец рассмотрены в работе [6]. Таким образом, в справочной литературе нет готовой модели, которую можно непосредственно использовать для решения выше поставленной задачи.

Целью данной работы является обоснование конструктивных параметров стальной крепи на основании исследования напряженно-деформированного состояния, жесткости и устойчивости обсадной трубы, как оболочки работающей на внешнее давление.

Для реализации поставленной цели необходимо решить следующие задачи: 1) разработать новую модель обсадной трубы с учетом местных концентраторов напряжений, 2) исследование напряженно-деформированное состояние, жесткость и устойчивость.

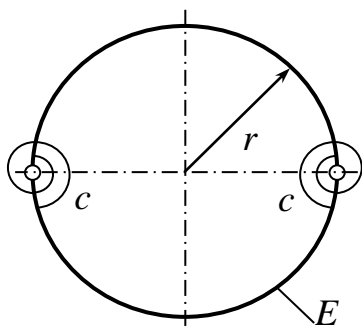


Рисунок 4. Схема

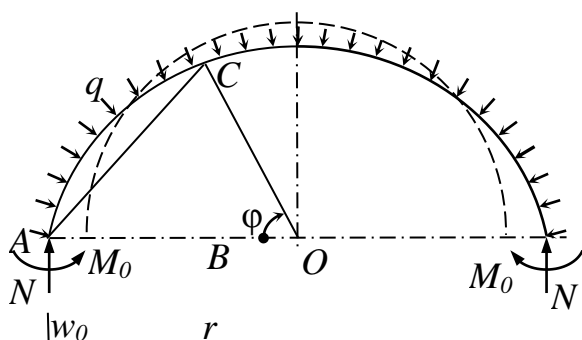


Рисунок 5. Схема распределения

с учетом, что

$AC^2 = OC^2 - OA^2 + 2OA \cdot AB$ , выражение (2) примет вид

$$M = -M_0 - 0,5q(OC^2 - OA^2). \tag{3}$$

Для исследования влияния ослабления цилиндрической жесткости в определенных сечениях трубы на величину критической нагрузки, рассмотрим кольцо радиусом  $r$ , с изгибной жесткостью  $EJ$ , которое в ослабленных сечениях имеет шарниры с упругой связью с жесткостью  $c$  (рис. 4).

Для решения задачи устойчивости кольца, под действием равномерно распределенного давления, представим конструкцию в деформированном состоянии (рис. 5). Продольное усилие, действующие со стороны отброшенной части, найдем из условия равновесия  $N = q \cdot OA$  части кольца. Изгибающий момент  $M_0$  определяется через жесткость упругой связи (1)

$$M_0 = -\frac{c}{r} \frac{dw}{d\varphi} \Big|_{\varphi=0}. \tag{1}$$

Момент в произвольном сечении будет

$$M = -M_0 + q \cdot OA \cdot AB - 0,5q \cdot AC^2, \tag{2}$$

Подставив в уравнение (3)  $OA = r + w_0$  и  $OC = r + w$ , и отбросив малые величины второго порядка, получим

$$M = -M_0 - qr(w^2 - w_0^2). \quad (4)$$

Для представленной расчетной схемы (рис. 5) дифференциальное уравнение радиальных перемещений имеет вид (5) [7]

$$\frac{d^2w}{d\varphi^2} + w = \frac{r^2}{EJ} (-M_0 - qr(w - w_0)). \quad (5)$$

Представим уравнение (5) в виде

$$\frac{d^2w}{d\varphi^2} + w \left( 1 + \frac{qr^3}{EJ} \right) = -\frac{M_0 r^2}{EJ} + \frac{qr^3 w_0}{EJ} \quad (6)$$

и введем обозначение  $k^2 = 1 + \frac{qr^3}{EJ}$ , тогда общее решение дифференциального уравнения (6) будет

$$w = A \sin k\varphi + B \cos k\varphi - \frac{M_0 r^2}{k^2 EJ} + \frac{w_0}{k^2} (k^2 - 1). \quad (7)$$

Определим постоянные интегрирования  $A$  и  $B$  (7) и выражение для момента  $M_0$ . Из условия отсутствия перемещения в окружном направлении и угла поворота в сечении  $\varphi = \pi/2$  получим

$$\left. \frac{dw}{d\varphi} \right|_{\varphi=\pi/2} = Ak \cos \frac{k\pi}{2} - Bk \sin \frac{k\pi}{2} = 0, \text{ откуда } A = B \tan \frac{k\pi}{2},$$

с учетом полученного выражения и зависимости (1) найдем  $M_0$

$$M_0 = -\frac{c}{r} Bk \tan \frac{k\pi}{2}.$$

Выражение для постоянной  $B$  получим исходя из зависимости

$$w(0) = w_0, \quad B \left( 1 + \frac{cr}{kJ} \tan \frac{k\pi}{2} \right) + \frac{w_0}{k^2} (k^2 - 1) = w_0, \text{ откуда } B = \frac{w_0}{k^2 + \chi k \tan \frac{k\pi}{2}}, \text{ где } \chi = \frac{cr}{EJ} -$$

относительная жесткость упругой связи. Подставив найденные выражения в уравнение (7) получим

$$w = \frac{w_0}{k^2 + \chi k \tan \frac{k\pi}{2}} \left( \tan \frac{k\pi}{2} (\sin k\varphi + \chi k) + \cos k\varphi + k^2 - 1 \right). \quad (8)$$

При потере устойчивости длина дуги кольца должна остаться неизменной, тогда с учетом симметрии должно выполняться условие [4]

$$\int_0^{\pi/2} r w d\varphi = 0, \text{ откуда } \frac{w_0 r}{k^2 + \chi k \tan \frac{k\pi}{2}} \left( \frac{\pi \chi k^2 + 2}{2k} \tan \frac{k\pi}{2} + \frac{\pi}{2} (k^2 - 1) \right) = 0. \quad (9)$$

Упростив выражение (9), получаем уравнение для определения критической нагрузки

$$\tan \frac{k\pi}{2} = \frac{\pi k (1 - k^2)}{\pi \chi k^2 + 2}. \quad (10)$$

На графике рис. 6 показана зависимость коэффициента  $k$  от параметра  $\chi$ , построена по численным исследованиям уравнения (10).

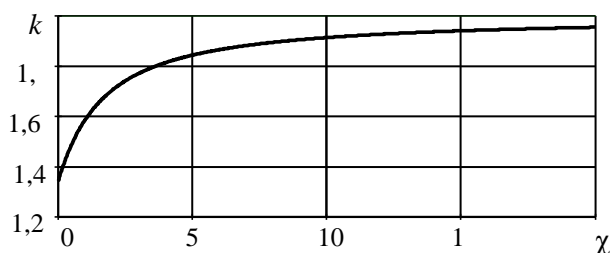


Рисунок 6. Зависимость коэффициента  $k$  от параметра  $\chi$

Из графика видим – с увеличением параметра  $\chi$  значение  $k$  стремится к 2, что соответствует значению коэффициента  $k$  для сплошного кольца [4, 5, 7].

Рассмотрим конкретные случаи, связанные с ослаблением изгибной жесткости обсадной трубы.

Как уже отмечалось, в процессе сборки колоны в трубе вырезают окна (рис. 2), которые впоследствии заглушают при помощи накладок, при этом шпангоут, который проходил через окно при восстановлении подрезают (рис. 7), что приводит к ослаблению сечения под монтажной балкой по длине всей колоны.

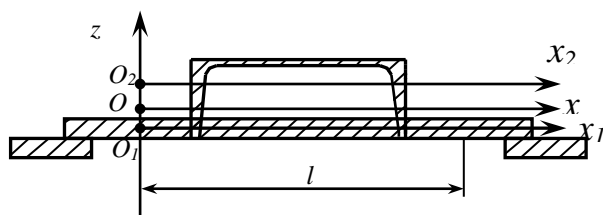


Рисунок 7. Расчетная схема.

В качестве примера, возьмем параметры конструкции: диаметр труб – 4,3 м, толщина стенки – 1,6 см, шпангоут – швеллер №16, шаг шпангоутов – 0,5 м, длина секции – 6 м (шаг расположения монтажных окон), размеры монтажного окна  $b \times h = 0,8 \times 0,6 \text{ м}^2$ . Условный момент инерции поперечного сечения подрезанного шпангоута найдем по методу, описанному в работе [8] с учетом проявления краевого эффекта на участке трубы длиной  $l$  (рис. 7) –  $J'_{\text{усл}} = 271 \text{ см}^4$ , момент инерции не подрезанного шпангоута [8] –  $J_{\text{усл}} = 488 \text{ см}^4$ , тогда момент инерции сечения трубы –  $J = 12J_{\text{усл}} = 5856 \text{ см}^4$ , здесь 12 – число шпангоутов на секции, момент инерции ослабленного сечения –  $J_1 = 11J_{\text{усл}} + J'_{\text{усл}} = 5639 \text{ см}^4$ .

Коэффициент жесткости  $c$  можно определить, как момент, вызывающий взаимный угол поворота  $\alpha = 1$  рад, на свободном конце, между пластинами с жесткостью  $EJ$  и  $EJ_1$  (рис. 8)

$$c = \frac{2EJ \cdot EJ_1}{b(EJ - EJ_1)}, \text{ соответственно } \chi = \frac{cr}{EJ} = \frac{2rJ_1}{b(J - J_1)}. \quad (11)$$

Для рассматриваемого примера  $\chi = 140$ , численно из формулы (10) находим  $k = 1,993$ , с учетом, что для сплошного кольца критическая нагрузка определяется зависимостью [4, 7]

$$q_{кр} = (n^2 - 1) \frac{EJ}{r^3}, \text{ где } n = 2,$$

при этом определим коэффициент снижения критической нагрузки

$$\Delta_q = \frac{k^2 - 1}{3} = 0,991.$$

Таким образом, из рассматриваемого случая, подрезание шпангоутов на монтажных окнах приводит к повышению критического давления на крепь не более чем на 1%. Это нужно учитывать при анализе общего напряженно-деформированного состояния и устойчивости обсадной металлической трубы. Данные расчеты позволят проанализировать возможность снижения общей материалоемкости крепи, уменьшить ее толщину, шаг расстановки шпангоутов, трудоемкость при ее изготовлении, включая прорезку окон, установку заглушек и прочее, и как итог – себестоимости изготовления.

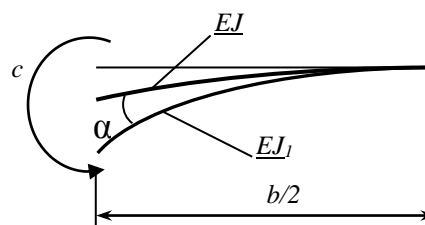


Рисунок 8. Схема деформации

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Общесоюзные нормы технологического проектирования шахтных стволов и скважин, сооружаемых способом реактивно-турбинного бурения (РТБ): ОНТП 3-80. – М.: Минуглепром СССР, 1980. – 74 с.
2. Жиленко, Н. П. Справочное пособие по реактивно-турбинному бурению. / Н. П. Жиленко, А. А. Краснощек – М.: Недра, 1987. – 309 с.
3. Добровольский Г. Б. Крепление скважин большого диаметра / Г. Б. Добровольский, Д. М. Казикаев, В. П. Петриченко – М.: Недра, 1988. – 238 с.
4. Вольмир, А. С. Устойчивость деформируемых систем / Вольмир А. С. – М.: Наука, 1967. – 984 с.
5. Алфутов, Н. А. Основы расчета на устойчивость упругих систем / Алфутов Н. А. – М.: Машиностроение, 1978. – 312 с.
6. Прочность устойчивость колебания: справочник: в 3 т. / [ред. Биргер И. А., Пановко Я. Г.]. – М.: Машиностроение, 1968. – Т. 2. – 831 с.
7. Тимошенко, С. П. Устойчивость упругих систем / С. П. Тимошенко, – М.: ОГИЗ Гос. Изд-во технико-теорет. Лит., – 1946. – 533 с.
8. Царенко, С. Н. Обоснование параметров стальной крепи при бурении шахтных вертикальных стволов: дис. ... канд. техн. наук / С.Н. Царенко. – Днепропетровск, 2008. – 158 с.

Поступила в редколлегию 14.05.2020 г.

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>Бахадиров Г. А., Цой Г. Н., Набиев А. М.</b> ОТЖИМ МОКРОГО КОЖПОЛУФАБРИКАТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВЛАГООТВОДЯЩЕГО СУКНА .....	3
<b>Гусаров С. В., Хорт Н. А., Подболотов К. Б.</b> ПРИМЕНЕНИЕ ФОСФАТНЫХ СВЯЗУЮЩИХ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ВИБРОЛИТЫХ ОГНЕУПОРНЫХ КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ОТХОДОВ ПРОИЗВОДСТВА И ВТОРИЧНЫХ РЕСУРСОВ .....	9
<b>Звягинцева А. В.</b> ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ КОМПОЗИТЫ В ПРИЛОЖЕНИЯХ МАШИНОСТРОЕНИЯ .....	15
<b>Митюшов Е. А., Мисюра Н. Е.</b> КВАТЕРНИОННЫЕ МОДЕЛИ В КИНЕМАТИКЕ И ДИНАМИКЕ СФЕРИЧЕСКОГО ДВИЖЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ .....	27
<b>Михайлов А. Н., Котляров С. Б., Котляров В. Б.</b> СИНТЕЗ МОДЕЛИ ФУНКЦИОНАЛЬНО-ОРИЕНТИРОВАННОЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ СОЗДАНИЯ КПП БЕЗ РАЗРЫВА ПОТОКА ПЕРЕДАВАЕМОЙ МОЩНОСТИ .....	35
<b>Михайлов Д. А., Шейко Е. А., Михайлов В. А., Михайлов А. Н.</b> МЕТОДИКА СИНТЕЗА СВЯЗНОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ МНОГОСЛОЙНОГО ФУНКЦИОНАЛЬНО- ОРИЕНТИРОВАННОГО ПОКРЫТИЯ ЛОПАТОК ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ .....	44
<b>Олексюк А. А., Гущин А. М., Бондарь Е. А.; Бондарь А. А.</b> ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНЕЧНЫХ ТЕМПЕРАТУР ТЕПЛОНОСИТЕЛЕЙ РЕКУПЕРАТИВНОГО ТЕПЛООБМЕННИКА .....	64
<b>Панычев С. А., Панычев А. И., Максимов А. В., Байбуз А. Г.</b> ПРИМЕНЕНИЕ ИНВАРИАНТНОГО ПОДХОДА В САМОДИАГНОСТИКЕ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ .....	69
<b>Ракунов Ю. П., Абрамов В. В., Ракунов А. Ю.</b> ЗАКОНОМЕРНЫЕ СООТНОШЕНИЯ ЗНАКОВЫХ СКОРОСТЕЙ РЕЗАНИЯ ТОКАРНОЙ ГРУППОВОЙ ОБРАБОТКИ .....	77
<b>Царенко С. Н., Петтик С. Н.</b> УСТОЙЧИВОСТЬ ОБСАДНОЙ ТРУБЫ, КАК ОБОЛОЧКИ РАБОТАЮЩЕЙ НА ВНЕШНЕЕ ДАВЛЕНИЕ .....	88

## ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ

Абрамов В. В.	77
Байбуз А. Г.	69
Бахадиров Г. А.	3
Бондарь А. А.	64
Бондарь Е. А.	64
Гусаров С. В.	9
Гущин А. М.	64
Звягинцева А. В.	15
Котляров В. Б.	35
Котляров С. Б.	35
Максимов А. В.	69
Мисюра Н. Е.	27
Митюшов Е. А.	27
Михайлов А. Н.	35, 44
Михайлов В. А.	44
Михайлов Д. А.	44
Набиев А. М.	3
Олексюк А. А.	64
Панычев А. И.	69
Панычев С. А.	69
Петтик С. Н.	88
Подболотов К. Б.	9
Ракунов А. Ю.	77
Ракунов Ю. П.	77
Хорт Н. А.	9
Царенко С. Н.	88
Цой Г. Н.	3
Шейко Е. А.	44



**ПРАВИЛА**  
**представления материалов в международный сборник научных трудов**  
**Донецкого национального технического университета**  
**«ПРОГРЕССИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ МАШИНОСТРОЕНИЯ»**

Международный сборник научных трудов Донецкого национального технического университета «Прогрессивные технологии и системы машиностроения» издается с 1994 года. В этом сборнике публикуются ученые и специалисты более чем из 30 стран мира.

Сборник научных трудов является специальным изданием, научно-технические статьи которого проходят **обязательное рецензирование**. Данный сборник включен в следующие программы:

1. В сборнике могут публиковаться научно-технические статьи и результаты диссертационных работ.
2. Сборник включен в **перечень ВАК ДНР** (приказ № 774 от 24.07.2017 г.).
3. Сборник имеет сайт <http://ptsm.donntu.org>, а также размещен на сайте кафедры «Технология машиностроения» ДонНТУ, г. Донецк: <http://tm.donntu.org>
4. Сборник включен **базу данных РИНЦ (Российский индекс научного цитирования) (лицензионный договор № 177-04/2013 от 12.04. 2013 г.)** и размещен на сайте НЭБ (Научная электронная библиотека, г. Москва, Россия, <http://elibrary.ru>)
5. Данный сборник имеет **международную индексацию ISSN 2073-3216 (печатная версия) и ISSN 2518-7120 (сетевое издание)**

Статьи представляемые в данный сборник должны отвечать следующим требованиям.

Содержание статей должно отражать новые достижения науки и техники в области машиностроения, их практическое значение, соответствовать технической направленности сборника и представлять интерес для широкого круга специалистов.

В статье должно быть кратко изложено то новое и оригинальное, что разработано авторами, показано преимущество перед аналогами предлагаемых разработок, описаны их особенности и практическая значимость. Результаты работы не должны представляться в виде тезисов.

Ответственность за нарушение авторских прав, за несоблюдение действующих стандартов и за недостоверность в статье данных полностью несут авторы статьи.

Присланные в редакционную коллегию статьи подвергаются обязательному рецензированию. Редакционная коллегия оставляет за собой право вносить в текст статьи изменения редакционного характера без согласования с авторами, а также не публиковать статьи, которые не отвечают нашим требованиям.

Языки представления рукописей: **русский, украинский и английский.**

**ОСНОВНАЯ ТЕМАТИКА СБОРНИКА**

Тематика представляемых статей должна основываться на проблемах машиностроения (механики) и представляться в рамках следующих направлений:

1. Практика и перспективы создания и применения прогрессивных и нетрадиционных технологий машиностроения. Интегрированные технологии. Сборка в машино и приборостроении. Абразивные и виброабразивные технологии. Гибридные и комбинированные технологии машиностроения.

2. Механизация и автоматизация производственных процессов машиностроения. Прогрессивное оборудование машиностроительных производств.

3. Комплексная автоматизация проектирования, подготовки и управления машиностроительным производством.

4. Проблемы создания и применения прогрессивных инструментов и инструментальных материалов в машиностроении.

5. Управление качеством продукции и технических систем машиностроения. Проблемы инженерии поверхностного слоя изделий.

6. Современные проблемы машиноведения и деталей машин.

7. Современные проблемы инженерии материалов. Упрочняющие технологии и покрытия изделий машиностроения. Наноматериалы и нанотехнологии в машиностроении.

8. Вопросы моделирования и расчетов сложных технологических систем машиностроения.

В рамках сборника можно представлять рекламу продукции, которая будет помещена после рукописей статей.

### **СОДЕРЖАНИЕ СТАТЕЙ**

Научно-технические статьи, представляемые в данный сборник должны иметь следующие элементы:

- постановка проблемы в общем виде и ее связь с важными научными и практическими заданиями;

- анализ последних достижений и публикаций, в которых начато решение данной проблемы, выделение нерешенных раньше частей общей проблемы, которым посвящается данная статья;

- формулирование цели и постановка задач работы;

- представление основного материала исследования с полным обоснованием полученных научных результатов, формулирование рекомендаций;

- выводы по данному исследованию и перспективы дальнейшего развития данного направления.

### **ПРЕДСТАВЛЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ**

Для принятия решения о включении материалов Вашей статьи в сборник необходимо выслать в адрес редакционной коллегии следующее:

- заявку и сведения об авторах статьи;
- материалы статьи;
- экспертное заключение о возможности публикации статьи в открытой печати;
- все материалы отправляются по E-mail по адресам: [tm@fimm.donntu.org](mailto:tm@fimm.donntu.org) или [mntk21@mail.ru](mailto:mntk21@mail.ru) .

### **ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ**

1. Текст статьи выполняется объемом от 5 до 10 страниц (**обязательно полные страницы**), формат А4 (210x297 мм) с полями: верхнее и нижнее – 30 мм, а левое и правое - 25 мм. Страницы не нумеровать. Статьи оформить с применением редактора WinWord (не ниже версии 6,0) шрифтом Times New Roman, выполненным в соответствии с образцом оформления, межстрочный интервал - 1,0, шрифт – 12pt. Материалы представить в электронном виде.

2. Порядок оформления. Материалы должны отвечать следующей структурной схеме: УДК, инициалы и фамилии авторов, ученая степень и звание (сокращение по ГОСТ 7.11 и 7.12), полное название организаций и стран, тел./факс, E-mail, название статьи, аннотация на языке статьи, ключевые слова, основной текст, заключение или выво-

ды, список литературы, дополнительные аннотации на других языках с ключевыми словами, внизу первой страницы необходимо указать авторский знак - ©. **УДК** печатать прописными (жирными) буквами в верхнем правом углу не отступая от верхнего поля. На следующей строке слева жирными строчными буквами – **инициалы и фамилии** авторов с учеными степенями и званиями, на следующих строках – полное название *организаций и стран* (через запятую, слева). На следующей строке курсивом слева – *тел./факс и электронный адрес* одного из авторов. Через один интервал - название статьи, печатать прописными (жирными) буквами, без переносов, центрировать по ширине, максимально три строки. Через один интервал - аннотации с ключевыми словами (слово аннотация не пишется) на двух языках шрифтом 10 pt, *курсивом*. Через один интервал – материалы статьи, шрифт 12 pt (язык изложения – по выбору авторов, межстрочный интервал 1,0). Внизу первой страницы статьи необходимо указать авторский знак - ©. Между соответствующими разделами статьи необходимо делать интервал. (См. образец оформления материалов). Абзац текста – 1,25.

3. Графический материал (рисунки, графики, схемы) следует выполнять в формате \*.bmp, \*.gif, \*.psx, \*.dwg, \*.jpg - размерами не менее 60x60 мм внедренными объектами (по ходу материалов). Все позиции, обозначенные на рисунке, должны быть объяснены в тексте. Позиции на рисунке должны располагаться по часовой стрелке. Под каждым рисунком указывается его номер и название, например: Рисунок 3. Схема устройства. Текст названия рисунка группируется с рисунком. Каждый рисунок должен иметь один интервал сверху и снизу.

4. Формулы и математические знаки должны быть понятны. Показатели, степени и индексы должны быть меньше основных знаков и выполняться в соответствии с редактором формул Microsoft Equation. Формулы номеруются (справа в круглых скобках, не отступая от правого поля), только в том случае, если на них в тексте имеются ссылки. Между крайними знаками формулы и текстом должен выполняться один интервал. Формулы выполняются курсивом.

**Стиль формул для Microsoft Equation:** Full - 12 pt, Subscript/Superscript - 10 pt, Sub-Subscript/Superscript - 8 pt, Symbol - 12 pt, Sub-Symbol - 10 pt.

5. Все таблицы должны иметь название и порядковый номер и располагаться после упоминания по тексту, например: Таблица 2. Классификация муфт. Каждая таблица должна иметь один интервал сверху и снизу.

6. **Список литературы** должен быть приведен в конце статьи в соответствии с ГОСТ 7.1-2003 . Перечень ссылок должен быть составлен в порядке упоминания в тексте. Ссылки на литературу заключаются в квадратные скобки. Количество библиографических источников должно быть не менее 5, в том числе 3 источника должно быть за последние 5 лет.

7. Файл со статьей необходимо назвать по фамилиям и инициалам авторов в соответствии с работой (например: Иванов И.И., Петренко П.П.)

8. Материалы статьи представляются в электронном виде.

9. Материалы, не отвечающие перечисленным требованиям и тематике данного сборника, а также поступившие в редакционную коллегию с опозданием, **опубликованы не будут**.

## **СТАТЬИ ДОЛЖНЫ ИМЕТЬ СЛЕДУЮЩУЮ СТРУКТУРУ:**

**1. УДК** (Например, **УДК 621.01**) (располагать вверху справа, шрифт жирный, 12 pt).

**2. Инициалы и фамилии авторов** (слева, шрифт жирный, 12 pt), ученая степень и звание, затем на следующей строке - полное название *организаций и стран* (слева, 12 pt), на следующей строке – *Тел./факс и электронный адрес* (слева, курсив, 12 pt).

**3. Название статьи** (слева, шрифт жирный, 12 pt, максимум три строки).

**4. Пустые строки, межстрочный интервал и размеры шрифта статьи.** Пустые строки выполняются между названием статьи - вверху и внизу, перед соответствующими разделами работы (один пробел) и списком литературы, а также между дополнительной аннотацией вверху и внизу. Межстрочный интервал – **1,0**. Размер шрифта статьи - **12 pt**, размер шрифта аннотаций и авторского знака - **10 pt**.

**5. Аннотации (Abstract)** (слово аннотация не пишется), (курсив, 10 pt). Первая аннотация пишется на языке статьи, а вторая на английском, если статья на английском языке, первая аннотация пишется на английском языке, а вторая – на русском языке.

В аннотации приводятся краткие сведения о всей статье в целом на языке статьи. Объем аннотаций приблизительно до 10 строк, аннотация выполняется курсивом.

**6. Ключевые слова (Keywords)** (приводится 5-6 ключевых слов статьи), выполняются курсивом на следующей строке от аннотации. (курсив, 10 pt)

**7. Введение (Introduction).** (12 pt)

Во введении приводится аналитический (исторический) обзор современного состояния вопроса исследования, выполняется постановка проблемы исследования или показывается актуальность данного исследования (работы). Здесь нужно обязательно указать результаты последних исследований других авторов. А также сформулировать цель и задачи исследований.

**8. Основное содержание и результаты работы (The main contents and outcomes of activity).** (Авторы могут дополнять работу другими разделами) (12 pt).

В данном разделе излагаются и подробно разъясняются полученные авторами теоретические положения и практические результаты. Приводятся принятые гипотезы и используемые допущения, разъясняются малоизвестные термины, аббревиатуры и условные обозначения. Для теоретических положений приводятся их доказательства и необходимые математические преобразования. Для экспериментальных исследований кратко описываются методики их проведения, способы обработки данных и результаты проверок адекватности и достоверности результатов.

**9. Авторский знак.** Внизу первой страницы статьи необходимо указать авторский знак - ©. Например: © Иванов И.И., Петренко П.П.; 2020 (10 pt).

**10. Заключение (Conclusion)** (12 pt)

В заключении излагаются выводы по полученным авторами результатам, описываются примеры их практического применения, предлагаются рекомендации относительно их использования, приводятся выводы, а также указываются перспективы дальнейших исследований по данной проблематике.

**11. Литература (References).** (12 pt)

Список литературных источников должен быть составлен в порядке ссылок на них. Ссылки на литературу в тексте статьи заключаются в квадратные скобки. Количество библиографических источников должно быть не менее 5-6, в том числе 3 источника должно быть за последние 5 лет.

**АДРЕС РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ:**

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

Тел./факс: +38 062 305-01-04.

E-mail: [tm@fimm.donntu.org](mailto:tm@fimm.donntu.org) или [mntk21@mail.ru](mailto:mntk21@mail.ru)

<http://ptsm.donntu.ru>

- **Публикация статей в международном сборнике научных трудов «Прогрессивные технологии и системы машиностроения» - выполняется бесплатно**

*Образец оформления материалов*  
УДК 621.85.05-034(12 pt)

**И. И. Иванов**, д-р техн. наук, проф., **П. П. Петренко**, ассист. (12 pt)  
Донецкий национальный технический университет, ДНР (12 pt)  
Брянский государственный технический университет, Россия (12 pt)  
Тел./Факс: +38 (062) 3050104; E-mail: [tm@fimm.donntu.org](mailto:tm@fimm.donntu.org) (курсив, 12 pt)

(пустая строка - 12 pt)

**ОСНОВЫ СТРУКТУРНОГО СИНТЕЗА СБОРОЧНЫХ СИСТЕМ**  
(слева, 12 PT, ЖИРНЫМ, ЗАГЛАВИЕ МАКСИМУМ ТРИ СТРОКИ)

(пустая строка - 12 pt)

*В статье приведены данные по структурному синтезу сборочных .....  
..... уравнений описывающих процесс сборки изделий. (курсив, 10 pt, до 10 строк).*

*Ключевые слова: структура технологии, синтез, процесс, технология, сборка. (курсив, 10 pt, 5 ...6 слов)*

(пустая строка - 10 pt)

**I. I. Ivanov, P. P. Petrenko** (10 pt)  
(10 pt)

**BASES OF THE STRUCTURED SYNTHESSES OF THE ASSEMBLY SYSTEMS** (10 pt)

*The efficient design of assembly machinery is vitally important .....  
.....as noun description of functions of presented in the paper.*

*Keywords: structured syntheses, process of the assembly, technological system. (курсив, 10 pt)*

(пустая строка - 12 pt)

**1. Введение** (12 pt)

Сборочные системы являются сложными иерархическими системами. Одним из условий [1] повышения производительности ... сборочных технологических систем (рис. 5). Технологические системы .....

(пустая строка - 12 pt)

**2. Основное содержание и результаты работы** (12 pt)

Для сборки изделий широко применяются технологические системы .....  
информационные и другие потоки могут быть описаны следующим образом:

$$k_m = \sqrt{a^2 + b^2}, \quad (1)$$

где  $k_m$  - элемент множества;

..... позволили разработать общие алгоритмы функционирования системы.

(пустая строка - 12 pt)

### **3. Общий алгоритм и рекомендации** (12 pt)

Выполненные исследования позволили разработать общий алгоритм .....

..... основывается на итерационном подходе.

(пустая строка - 12 pt)

### **4. Цифровые модели** (12 pt)

В работе разработаны цифровые структурно-логические модели структуры сборочных систем, выполненные с применением основных положений алгебры структур .....

(пустая строка - 12 pt)

### **5. Заключение** (12 pt)

Таким образом, выполненные исследования позволили реализовать следующее:

1. Разработать методику синтеза структурных вариантов .....

..... отличительной особенностью данной методики.

2. Установить закономерности .....

..... позволили произвести процесс итерации.

3. Разработать рекомендации .....

© Иванов И.И., Петренко П.П.; 2016 (приводится внизу первой страницы статьи, 10 pt)

..... внедрить на производстве.

(пустая строка - 12 pt)

### **ЛИТЕРАТУРА:**

(центрировать, 12 pt, не менее 5 ... 6 библиографических источников)

1. Ким, И. П. Исследование эффективности роторных машин / И. П. Ким. – К: КПИ, 1985. – 123 с. ISBN 966-7907-22-8.

2. Устюгов, А. В. Надежность технологических машин / А. В. Устюгов. – Донецк: ДонНТУ, 1998. – 425 с. ISBN 966-7907-23-6.

3. Савельев, А. А. Сборка машин / А. А. Савельев – М.: Наука, 2009. - 342 с. ISBN 966-7907-26-9.

4. Михайлов, А. Н. Основы синтеза функционально-ориентированных технологий / А. Н. Михайлов – Донецк: ДонНТУ, 2009. – 346 с. ISBN 966-7907-24-4.

5. Базров, Б. М. Модульные технологии / Б. М. Базров. – М.: Машиностроение, 2000. – 368 с. ISBN 5-217-03061-5.

6. Сидоров, И. А. Учет переменности параметров процесса точения фасонных поверхностей при определении оптимальных режимов резания / И.А. Сидоров, А.Н. Алехин // Научно-технический журнал. – М: Машиностроение. – 2014. - № 9. – С. 11-17.

7. Любшин, А. Н. Особенности полировки лопаток с коррозионными разрушениями покрытий / А. Н. Любшин, А. Н. Шейко, Б. Л. Недашковский // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научных работ. – Донецк: ДонНТУ, 2013. – Вып. 1 (25). – С. 207-212

(пустая строка - 12 pt)

Поступила в редколлегию \_\_\_\_\_ (дата поступления статьи, 10 pt)

**НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ**

**ПРОГРЕССИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И  
СИСТЕМЫ МАШИНОСТРОЕНИЯ**

**Выпуск 4 (71)' 2020**

Главный редактор  
*д-р техн. наук, проф. А.Н. Михайлов*  
E-mail: [tm@fimm.donntu.org](mailto:tm@fimm.donntu.org)  
*Технический редактор Л. Б. Ступакова*

*Учредитель и издатель – ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ*

Адрес издателя: ДНР, 83001, г. Донецк, ул. Артема, 58, ГОУВПО «ДОННТУ»,  
+38 (062) 337-17-33, 335-75-62

Адрес редакции: ДНР, 83001, г. Донецк, ул. Артема, 58, тел. +38 (071) 306-08-79,  
+38 (062) 301-08-05.

E-mail: [tm@fimm.donntu.org](mailto:tm@fimm.donntu.org)

Сайт: <http://ptsm.donntu.org>

Сборник (Е) зарегистрирован в Министерстве информации Донецкой Народной Республики.