

Вып. 3(70)'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 3 (70)' 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 3 (70)' 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, 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 621.873

Е. М. Арефьев, канд. техн. наук., доцент, **С. А. Матвиенко**, канд. техн. наук.
Донецкий национальный технический университет, г. Донецк, ДНР
Тел. +38 (071)-3678009, E-mail: serge-matvienko@yandex.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОСНОВНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК БАШЕННОГО КРАНА НА СРЕДНЕВЗВЕШЕННУЮ ДЛИТЕЛЬНОСТЬ ЦИКЛА ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ГРУЗА

В статье установлена функция длительности цикла башенного крана; разработан алгоритм расчета средневзвешенной длительности цикла перемещения груза; представлены результаты исследования влияния скорости подъема, скорости передвижения и скорости поворота башенного крана на средневзвешенную длительность цикла перемещения груза.

Ключевые слова: цикл, средневзвешенная длительность, функция, алгоритм, скорость подъема, скорость передвижения, башенный кран

E. M. Arefev, S. A. Matvienko

STUDY OF THE INFLUENCE OF THE MAIN TECHNICAL CHARACTERISTICS OF A TOWER CRANE ON THE WEIGHTED AVERAGE DURATION OF THE CARGO MOVEMENT CYCLE

The article has a function of cycle time tower crane; the algorithm of calculation of the weighted average duration of the displacement cycle of the goods; presents the results of a study the effects of lifting speed, travel speed and speed of rotation of the tower crane on the weighted average duration of the cycle of movement of cargo.

Keywords: cycle, weighted average duration, function, algorithm, lifting speed, movement speed, tower crane

Введение. Башенный кран является одним из ключевых компонентов в большинстве современных строительных проектов. Выбор типа и расположения башенных кранов, используемых при строительстве зданий, является важным вопросом при планировании строительных работ. Работа башенного крана имеет циклический характер. Важным фактором является число циклов за единицу общего времени. Цикличность оказывает определяющее значение не только на производительность, но и на долговечность крана. Максимальная производительность башенного крана достигается при минимальной продолжительности цикла выполнения операции $T_{ц}$. Поэтому оптимизация этого параметра является важной научной и практической задачей [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8].

Цель исследования. Исследование влияния основных технических характеристик башенного крана на средневзвешенную длительность цикла перемещения груза и выявление наиболее эффективного пути её снижения.

Материалы и результаты исследований. При перемещении груза башенный кран выполняет следующую последовательность операций: подъем перемещаемого груза, поворот башни на 180° , перемещение к месту спуска груза, окончательное регулирование координаты спуска груза с помощью передвижения грузовой тележки вдоль стрелы, спуск груза.

При этом в зависимости положения начальной и конечной точек в рабочей области, некоторые операции могут не выполняться. На рис. 1 изображена схема перемещения груза башенным краном при расположении начальной и конечной точек размещения груза в различных координатных плоскостях. При такой схеме перемещения груза, кран выполняет последовательность операций, перечисленных выше. Во втором случае, когда груз перемещается в пределах одной координатной плоскости, операция поворота башни крана не выполняется (рис. 2).

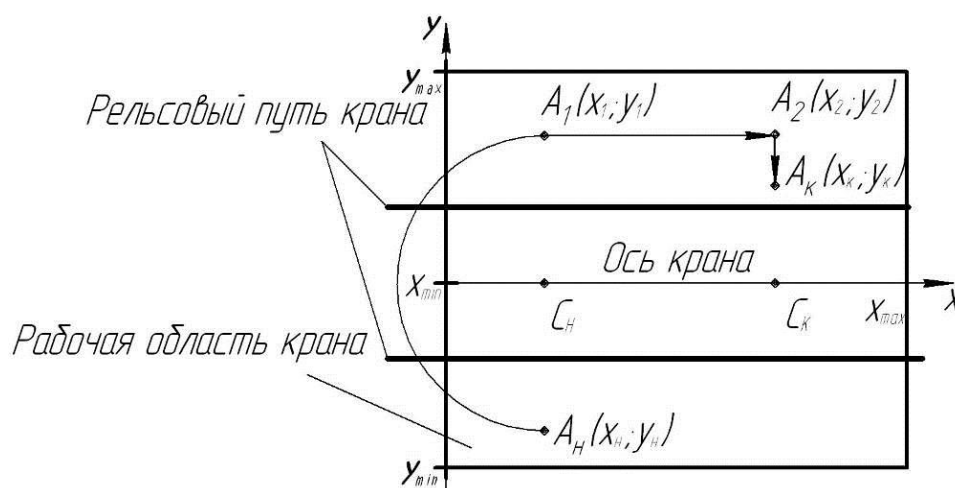


Рисунок 1. Схема перемещения груза башенным краном из одной координатной плоскости в другую

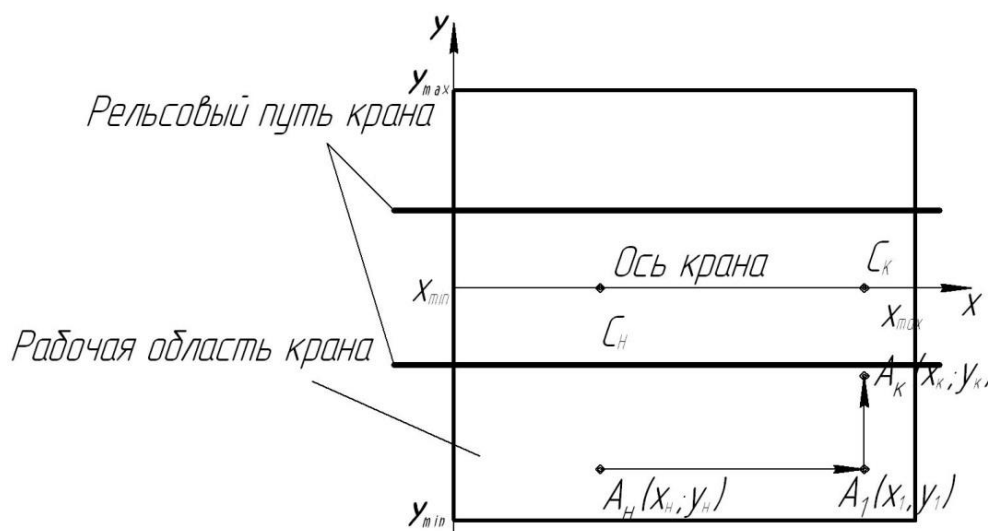


Рисунок 2. Схема перемещения груза башенным краном в пределах одной координатной плоскости: A_H, A_K – точка с координатами начала подъема груза и разгрузки соответственно; $A_{1,2}$ – промежуточная координата перемещения груза; C_H – точка центра вращения башни крана вначале подъема груза; C_K – точка центра вращения башни крана при спуске груза; $x_{min}, x_{max}, y_{min}, y_{max}$ – координаты, задающие рабочую область крана

Длительность цикла перемещения груза башенным краном можно разделить на три этапа: длительность подъема груза ($T_{под}$), длительность поворота ($T_{пов}$), длительность перемещения крана ($T_{дв}$).

Тогда полное время цикла перемещения краном груза будет равно:

$$T_{под} = T_{под} + T_{пов} + T_{дв},$$

$$T_{под} = \frac{h_{под}}{v_{под}}, \quad T_{пов} = \frac{\varphi}{\omega_{пов}}, \quad T_{дв} = \frac{l_{кр}}{v_{пер}} + \frac{l_{мел}}{v_{мел}}, \quad (1)$$

где: φ – угол поворота крана ($\varphi = 180$ град); $\omega_{пов}$ - скорость поворота башни крана, об/мин; $v_{пер}$ - скорость перемещения башенного крана, м/мин; $v_{мел}$ - скорость перемещения грузовой тележки крана, м/мин; $v_{под}$ - скорость подъема башенного крана, м/мин; $h_{под}$ – высота подъема груза; $l_{кр}$, $l_{мел}$ - путь, проходимый соответственно грузом при передвижении крана и перемещении тележки, который можно выразить как:

$$l_{кр} = |x_k - x_n|;$$

$$l_{мел} = |y_k + y_n| \text{ - при схеме перемещения груза башенным краном из одной координатной плоскости в другую;}$$

$$l_{мел} = |y_k - y_n| \text{ - при схеме перемещения груза башенным краном в пределах одной координатной плоскости.}$$

Тогда получим:

при $y_n < 0$ и $y_k > 0$ или $y_n > 0$ и $y_k < 0$:

$$T(x_n, x_k, y_n, y_k) = \frac{\varphi}{\omega_{пов}} + \frac{|x_k - x_n|}{v_{пер}} + \frac{|y_n + y_k|}{v_{мел}} + 2 \frac{h_{под}}{v_{под}}, \quad (2)$$

при $y_n > 0$ и $y_k > 0$ или $y_n < 0$ и $y_k < 0$:

$$T(x_n, x_k, y_n, y_k) = \frac{|x_k - x_n|}{v_{пер}} + \frac{|y_k - y_n|}{v_{мел}} + 2 \frac{h_{под}}{v_{под}}, \quad (3)$$

где y_n, x_n (y_k, x_k) - начальные (конечные) координаты груза при его перемещении.

Очевидно, что T – функция 4-х случайных величин x_n, y_n, x_k, y_k . Математическое ожидание этой функции определяется по зависимости [5]:

$$T_{CB} = \int_{x_{min}}^{x_{max}} \int_{y_{min}}^{y_{max}} \int_{x_{min}}^{x_{max}} \int_{y_{min}}^{y_{max}} T(x_n, y_n, x_k, y_k) \cdot f(x_n, y_n) \cdot f(x_k, y_k) dy_k dx_k dy_n dx_n, \quad (4)$$

Где $x_{min}, x_{max}, y_{min}, y_{max}$ – предельные значения координат задающих рабочую зону башенного крана.

Вычисление функции средневзвешенного значения длительности цикла в заданном виде в математическом редакторе *MathCad* связано с большим количеством операций и приводит к зависанию системы. Поэтому перейдем от интеграла к сумме. При этом рабочая зона делится на конечные площадки прямоугольной формы (площадки разбиения).

$$T_{ca} = \sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^N \sum_{k=0}^N \sum_{l=0}^N T(x_i, y_j, x_k, y_l) F_{ij} F_{kl}, \quad (5)$$

где N – число точек, на которые разбиваются оси координат с равномерным шагом;
 $x_i, y_j, x_k, y_l - i, j, k, l$ -ая координата перемещения груза в рабочей зоне крана;
 F – вероятность попадания точки в заданный квадрат разбиения.

$$F = f(x, y) \cdot \Delta x \cdot \Delta y$$

$$\Delta x = \frac{x_{\max} - x_{\min}}{N}, \Delta y = \frac{y_{\max} - y_{\min}}{N}, \quad (6)$$

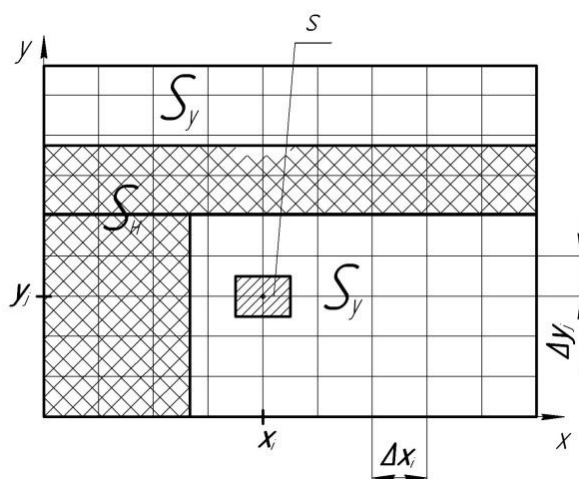


Рисунок 3. Схема разбиения рабочей зоны башенного крана

Алгоритм расчета средневзвешенной длительности цикла перемещения груза. Ввод исходных данных:

- скорость перемещения башенного крана, м/мин;
- скорость перемещения грузовой тележки крана, м/мин;
- скорость поворота башни крана, об/мин;
- угол поворота крана ($\varphi = 180$ град);
- скорость подъема башенного крана, м/мин;
- предельные значения координат задающих рабочую зону башенного крана.

Задаём число точек, на которые разбиваются оси координат.

Рассчитываем:

- величину скорости поворота башни крана в рад/с;
- площадь рабочей зоны крана;
- площадь рабочей зоны крана, по которой не перемещается груз;
- значение координаты каждой точки, которые разбивают оси координат;
- функцию распределения координат точки перемещения груза башенным краном в пределах его рабочего участка (плотность вероятности);
- вероятность попадания точки в заданный квадрат разбиения;
- функцию длительности цикла, которая зависит от начальных и конечных координат расположения перемещаемого краном груза;
- средневзвешенную длительность цикла перемещения груза.

Выводим результат.

Определение количества точек разбиения рабочей зоны крана. Изменяя число точек (p), на которые разбиваются оси координат с определенным интервалом рас-

считываем средневзвешенную длительность цикла для каждого значения этих точек. Результаты расчетов представлены в таблице 1.

Таблица 1. Расчетные значения средневзвешенной длительности цикла при различных значениях точек, на которые разбиваются оси координат.

p	$T_{св}$	$\Delta, \%$	p	$T_{св}$	$\Delta, \%$
1	16,51	611,64	16	2,53	9,05
2	7,38	218,10	17	2,31	0,43
3	4,46	92,24	18	2,44	5,17
4	3,96	70,69	19	2,46	6,03
5	3,19	37,50	20	2,37	2,16
6	3,12	34,48	21	2,51	8,19
7	3,08	32,76	22	2,34	0,86
8	2,75	18,53	23	2,43	4,74
9	2,76	18,97	24	2,29	1,29
10	2,54	9,48	25	2,39	3,02
11	2,8	20,69	26	2,4	3,45
12	2,45	5,60	27	2,34	0,86
13	2,63	13,36	28	2,36	1,72
14	2,64	13,79	29	2,24	3,45
15	2,51	8,19	30	2,32	0,00

Погрешность расчета средневзвешенной длительности цикла для текущего значения количества точек p , на которые разбиваются оси координат ($T_{св p}$) относительно средневзвешенной длительности цикла при $p=30$:

$$\Delta = \frac{|T_{св p} - T_{св 30}|}{T_{св 30}}, \% \quad (7)$$

Графическая зависимость расчетной средневзвешенной длительности цикла от количества точек разбиения рабочей зоны представлена на рис. 4.

Анализируя полученные результаты вычислений приходим к выводу, что достаточная точность расчета достигается при разбиении рабочей зоны на 22 точки.

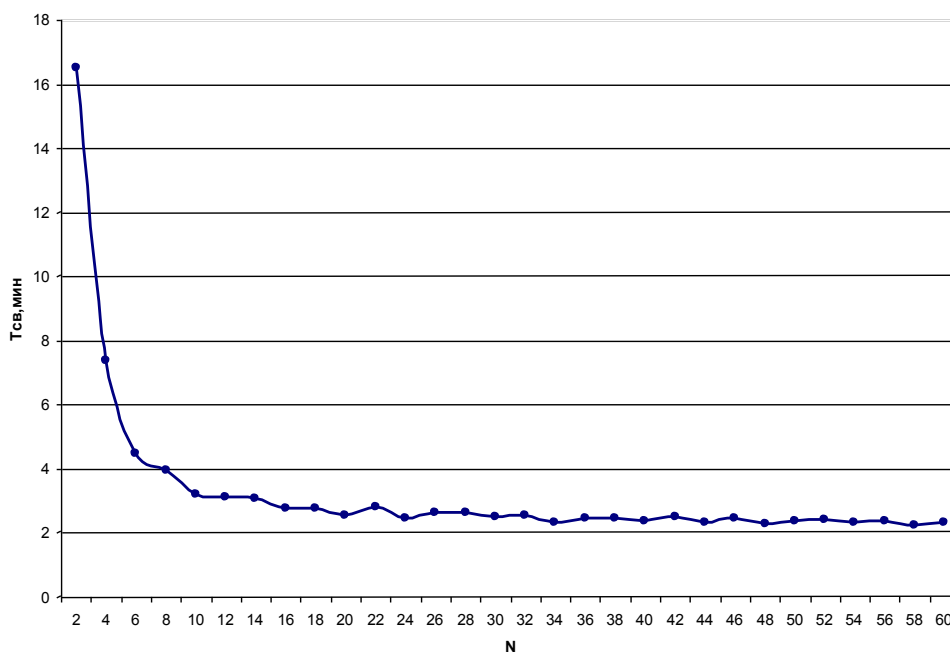


Рисунок 4. Зависимость расчетной средневзвешенной длительности цикла от количества точек разбиения рабочей зоны

График зависимости средневзвешенной длительности цикла перемещения груза башенным краном при изменении скорости подъема представлен на рис. 5. Скорость задавалась в соответствии с формулой:

$$v' = K_{изм} v_{под}, \tag{8}$$

где v' – измененная скорость подъема крана;
 $K_{изм}$ – коэффициент изменения, %

Таблица 2. Влияния скорости подъема башенного крана на средневзвешенную длительность цикла перемещения груза

Коэффициент изменения скорости, %	25	50	75	100
Значение скорости подъема, м/мин	40	48	56	64
Средневзвешенная длительность цикла перемещения, груза мин	2,21	2,16	2,11	2,08
Значение изменения средневзвешенной длительности цикла перемещения, %	4	6	9	10

Аналогично строим график зависимости средневзвешенной длительности цикла перемещения груза башенным краном от скорости передвижения крана (рис. 6).

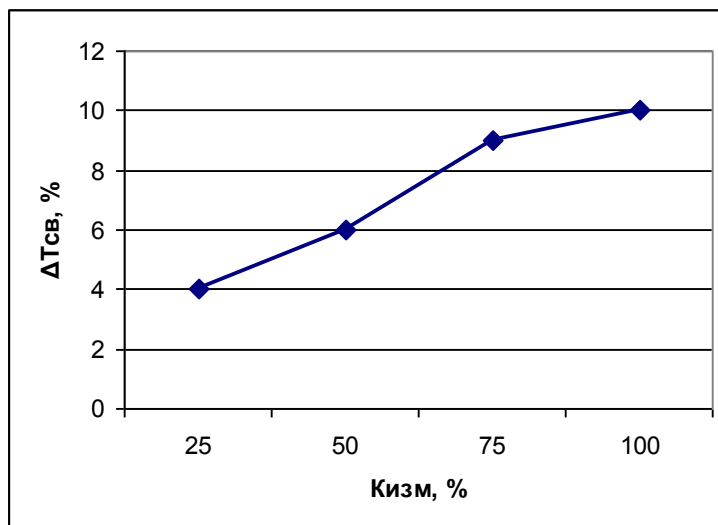


Рисунок 5. График зависимости изменения расчетной средневзвешенной длительности цикла от скорости подъема башенного крана

Таблица 3. Влияние скорости перемещения башенного крана на средневзвешенную длительность цикла перемещения груза

Коэффициент изменения скорости, %	25	50	75	100
Значение скорости передвижения, м/мин	36,6	44	51,3	58,6
Средневзвешенная длительность цикла перемещения груза, мин	2,13	2	1,92	1,85
Значение изменения средневзвешенной длительности цикла перемещения, %	8	13	17	20

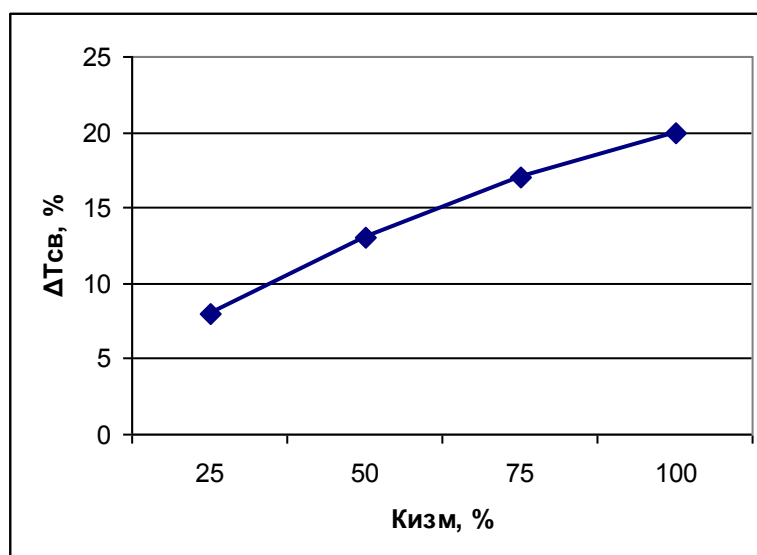


Рисунок 6. График изменения зависимости расчетной средневзвешенной длительности цикла от скорости перемещения башенного крана

Результаты исследования влияния скорости передвижения грузовой тележки башенного крана на средневзвешенную длительность цикла перемещения груза представлены в табл. 4 и на рис. 7.

Таблица 4. Влияния скорости перемещения грузовой тележки башенного крана на средневзвешенную длительность цикла перемещения груза.

Коэффициент изменения скорости, %	25	50	75	100
Значение скорости передвижения тележки, м/мин	34,9	41,9	48,8	55,8
Средневзвешенная длительность цикла Перемещения груза, мин	2,21	2,15	2,11	2,08
Значение изменения средневзвешенной длительности цикла перемещения, %	4	7	9	10

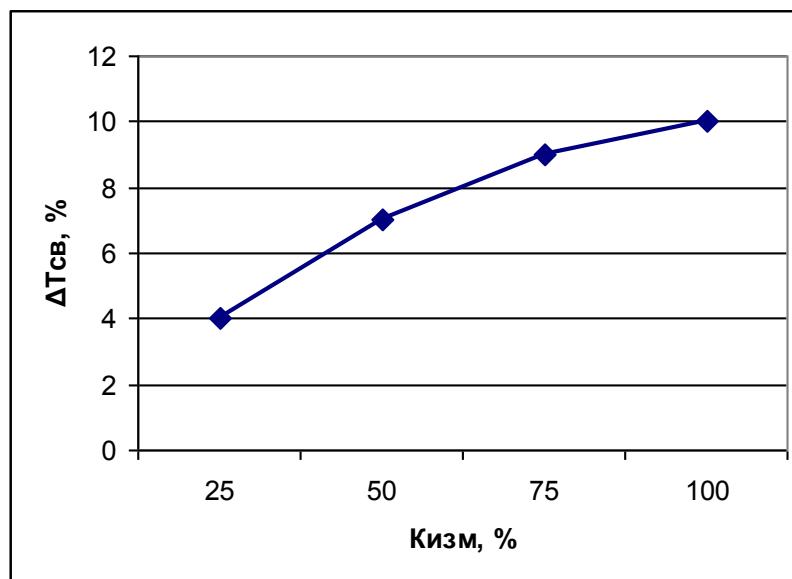


Рисунок 7. График зависимости изменения расчетной средневзвешенной длительности цикла от скорости перемещения грузовой тележки башенного крана

Результаты исследования влияния скорости поворота башенного крана на средневзвешенную длительность цикла перемещения груза представлены в табл. 5 и на рис. 8.

Таблица 5. Влияния скорости поворота башенного крана на средневзвешенную длительность цикла перемещения груза

Коэффициент изменения скорости, %	25	50	75	100
Значение скорости поворота башенного крана, м/мин	1,08	1,29	1,51	1,72
Средневзвешенная длительность цикла перемещения груза, мин	2,21	2,15	2,1	2,07
Значение изменения средневзвешенной длительности цикла перемещения, %	4	7	9	10

Выводы. Достаточная точность расчета средневзвешенной длительности цикла башенного крана достигается при разбивании рабочей зоны на 22 точки. При увеличении скоростей перемещения грузовой тележки, передвижения башенного крана и поворота башенного крана, также увеличивается и средневзвешенная длительность цикла, но в меньшем % соотношении.

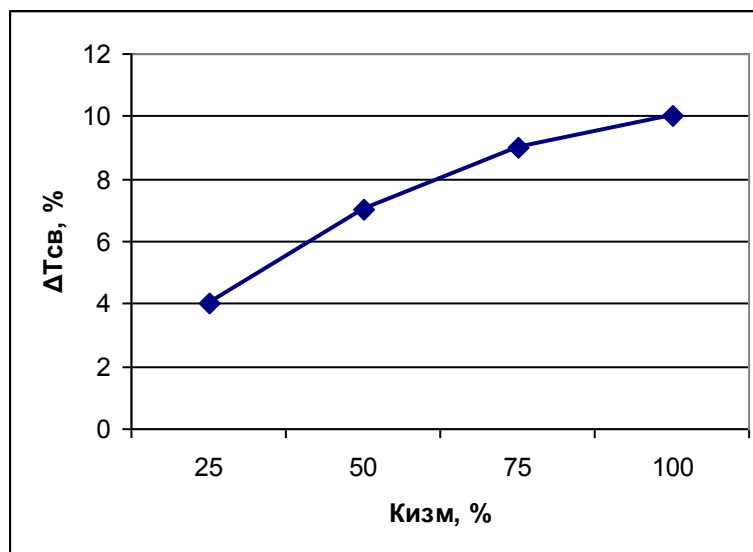


Рисунок 8. График зависимости изменения расчетной средневзвешенной длительности цикла от скорости поворота башенного крана

ЛИТЕРАТУРА:

1. Анисимова, Д. Ю. Метод повышения производительности башенного крана в гражданском строительстве / Д. Ю. Анисимова, В. В. Ильина // Вестник науки. – 2020. – № 1 (22). – Т.3. – С. 127-130.
2. Малев, А. А. Оптимизация подбора башенного крана путем построения номограммы производительности / А. А. Малев. // Молодой ученый. - 2019. – № 21 (259). – С. 143-146. – URL: <https://moluch.ru/archive/259/59623/>.
3. Abdelmegid, M. A. GA optimization model for solving tower crane location problem in construction sites / M. A. Abdelmegid et al. // Alexandria Eng. J. (2015). – <http://dx.doi.org/10.1016/j.aej.2015.05.011>.
4. Shapira, A. Tower crane cycle times: Case study of remote-control versus cab-control operation / A. Shapira, A. Elbaz // Journal of Construction Engineering and Management. – 2014. – № 140(12). – S. 307-318.
5. Abdel-Khalek, H. A Computer-based Model for Optimizing the Location of Single Tower Crane in Construction Sites / H. Abdel-Khalek, K. Shawki, M. Adel // International Journal of Engineering Science and Innovative Technology (IJESIT). – 2013. – Т.2 №2. – S. 438-446.
6. Marzouk, M. Decision support for tower crane selection with building information models and genetic algorithms / M. Marzouk, A. Abubakr // Autom. Constr. – 2016. – № 61. – S. 1–15.
7. Shapira, A. Characteristics of Equipment Planning for Multi-Crane Building Construction Sites / A. Shapira, A. Ben-David // Buildings. – 2017. – №7(3). – <https://doi.org/10.3390/buildings7030081>.
8. Ji, Y. Automated tower crane planning: Leveraging 4-dimensional BIM and rule-based checking / Y. Ji, F. Leite // Autom. Constr. – 2018. – №93. – S. 78 - 90.

Поступила в редколлегию 18.03.2020 г.

УДК 621.793

¹М. А. Белоцерковский, д-р техн. наук, проф., ²К. Е. Белявин, д-р техн. наук, проф.,
¹И. А. Сосновский, ¹А. А. Курилёнок, канд. техн. наук

¹Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, Минск, РБ,

²Белорусский национальный технический университет, Минск, РБ.

Тел.: 284-15-42, факс: 284-08-90, E-mail: sos3@tut.by

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СХЕМЫ И УНИВЕРСАЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ЦЕНТРОБЕЖНОГО ИНДУКЦИОННОГО ФОРМОВАНИЯ ПОРОШКОВЫХ ПОКРЫТИЙ

В статье представлены известные и вновь разработанные принципиальных технологические схемы центробежного формования порошковых покрытий. Дана их классификация по кинематическому исполнению, учитывающему направление действующих сил и обеспечивающих под влиянием раздельного действия радиальных, осевых, совместного действия радиально-осевых, радиально-тангенциальных, раздельного последовательного действия радиального и осевого направления сил для получения цилиндрических покрытий на цилиндрических поверхностях, плоских покрытий на торцевых поверхностях и покрытий другой более сложной эллипсоидной и сферической формы. Даны рекомендации по особенностям проектирования центробежных установок и приведены их разработанные, изготовленные, внедренные конструкции.

Ключевые слова: технологические схемы, классификация, центробежное индукционное формование, порошковые покрытия, универсальные центробежные установки.

M. A. Belotserkovsky, K. E. Belyavin, I. A. Sosnovsky, A.A. Kurilyonok

TECHNOLOGICAL SCHEME AND DESIGN OF UNIVERSAL EQUIPMENT FOR CENTRIFUGAL INDUCTION MOLDING OF POWDER COATINGS

The article presents the well-known and newly developed basic technological schemes of centrifugal forming of powder coatings. They are classified by kinematic design, taking into account the direction of the acting forces and providing under the influence of separate action of radial, axial, combined action of radial-axial, radial-tangential, separate sequential action of radial and axial forces to obtain cylindrical coatings on cylindrical surfaces, flat coatings on end surfaces and other more complex ellipsoid and spherical forms. Recommendations are given on the design features of centrifugal installations and their developed, manufactured, and implemented designs are given.

Keywords: technological schemes, classification, centrifugal induction molding, powder coatings, universal centrifugal installations.

1. Введение

Одним из наиболее эффективных методов нанесения порошковых покрытий на детали является центробежная индукционная наплавка (ЦИН) порошка к их поверхности [1]. Указанный метод позволяет наносить покрытия на внутренние, наружные, торцевые поверхности, а также одновременно на несколько поверхностей детали.

Любая принципиальная схема центробежного индукционного формования представляет собой простейший вариант реализации технологии нанесения порошковых покрытий с необходимым наличием основных операций нагрева и вращения, отличительные особенности исполнения которых характеризуются расположением детали в пространстве, источника тепла относительно нагреваемой поверхности, расположением осей вращения по отношению к оси детали, и определяют вследствие этого индивидуальную сущность процесса.

Для организации на заводах различного профиля участков по изготовлению широкой номенклатуры деталей с покрытиями методом ЦИН необходимо наличие цен-

тробежных установок, способных легко перенастраиваться на работу с заготовками разных типоразмеров, а также укомплектовываться необходимым набором технологической оснастки и приспособлений. Применение последних необходимо для того, чтобы обеспечить с требуемой производительностью изготовление заготовок с покрытиями в наладочном, механизированном и автоматическом режимах работы с использованием различных источников индукционного нагрева, в том числе, чтобы повысить качество покрытий (однородность свойств в механическом отношении по объему покрытия, прочность сцепления с основой и др.), уменьшить припуски на обработку для эффективной экономии дефицитных материалов. Обладая указанными свойствами, установки этого типа должны отличаться простотой управления.

Целью работы являлось описание известных и вновь разработанных технологических схем, а также особенностей проектирования универсального оборудования для центробежного индукционного формования порошковых покрытий, классификация центробежного индукционного нанесения порошковых покрытий по кинематическим признакам и направлению действующих сил.

2. Разработка технологических схем для центробежного индукционного формования покрытий

В принципиальных технологических схемах центробежного формообразования (или формования) порошковых покрытий тот или иной геометрический профиль, получаемый на свободной внутренней поверхности наносимого слоя в холодном состоянии главным образом зависит от соответствующих кинематических вариантов исполнения совместных вращений заготовки и порошка, помещенного с неполным заполнением ее внутреннего объема, и реализуемой при этом в каждом конкретном случае вращения определенной направленностью центробежных сил, действующих на порошковую систему.

В зависимости от кинематического исполнения устройства вращения холодное и горячее центробежное формование может осуществляться под давлением однонаправленных радиальных или осевых сил, разнонаправленных раздельно действующих радиальных и осевых сил, разнонаправленных совместно действующих радиальных и осевых сил, совместно действующих радиальных сил от собственного и внешнего вращения детали, что возбуждает в порошковой системе разнонаправленные активирующие силовые возмущения.

Таким образом, кинематический признак вращения в центробежном припекании объединяет основные факторы (направление возбуждаемых сил, форму образуемого покрытия, активирующие силовые возбуждения и т.д.), определяющие технологические возможности способа. Поэтому кинематический признак целесообразно взять в качестве главного признака, относительно которого выполнить классификацию принципиальных схем центробежного формования порошковых покрытий. Такая классификация приведена на рис.1. В основе ее лежит анализ работ по центробежному индукционному нанесению порошковых покрытий припеканием и наплавкой [2-8].

По кинематическому исполнению принципиально схемы центробежного индукционного формования могут быть разделены на схемы процессов, в которых формование порошковых покрытий реализуется одноосным и двухосным вращением.

Формование покрытий одноосным вращением осуществляется относительно собственной оси детали и относительно внешней оси, перпендикулярной собственной оси детали.

Двухосное формование порошковых покрытий может осуществляться при совместном одновременном вращении относительно каждой оси и отдельным вращением – сначала относительно собственной оси, а затем относительно внешней.

Формование совместным вращением может быть также выполнено относительно взаимно пересекающихся осей в центре сферической детали.

Принципиальные технологические схемы центробежного индукционного припекания с формованием порошка, реализуемого одноосным вращением, приведены на рис. 2 а, б, в, г. В кинематическом исполнении они являются самыми простыми в технологии и поэтому их исполнению всегда отдают предпочтение.

Известно, что в технологии нанесения покрытий схему (см. рис. 2 а) с наружным нагревом горизонтально расположенной стальной заготовки и одноосным вращением относительно собственной оси с постоянной угловой скоростью вместе с шихтой, приготовленной из смеси металлических порошка с флюсом и помещенной в полость заготовки, обычно рекомендовали использовать для формования наплавкой бронзовых и твердосплавных слоев на внутренних поверхностях. Особенностью метода являлось формирование расплавленного металла под действием центробежных сил, которые, с одной стороны, гарантируют равномерное распределение расплавленного слоя на основном металле заготовки и удаление посторонних примесей, а с другой – ухудшают структуру полученных сплавов и усугубляют ликвационные явления. Трансформация этой схемы наплавки в схему припекания устранила бы указанные выше недостатки, но осуществление ее требует обеспечения определенных условий, гарантирующих формирование осесимметричного порошкового слоя при пониженных по сравнению с наплавкой температурах спекания. В отличие от наплавки формирование ассиметричного слоя в процессах припекания обеспечивается сыпучестью порошка, находящегося в твердом состоянии. Наличие большого количества порошкового флюса, вводимого при наплавке, недопустимо для процессов припекания, так как он ухудшает сыпучесть металлических порошков и их способность к формованию в холодном состоянии. Поэтому для осуществления рассматриваемой схемы припекания с одноосным вращением относительно собственной горизонтально расположенной оси предлагается использовать самофлюсующиеся сплавы. Необходимость введения флюса в данном случае отпадает, а операция формования гарантируется для сферических порошков крупной фракции.

Схема нанесения покрытий, изображенная на рис. 2б, отличается от схемы 2а внутренним расположением индуктора. Исполнение схемы с внутренним нагревом требует применения открытой с торца формы, что изменяет условия теплообмена с внешней средой. Схему используют в технологии наплавки, в которой формование слоя реализуется центробежной заливкой. Известно также применение ее и для наплавки порошковых материалов. При формовании порошковых покрытий необходимо отметить, что у открытой формы имеется больше технологических возможностей, чем у закрытой формы. Оно может осуществляться, как и в схеме, изображенной на рис.2а, с закрытой формой, за счет сыпучести порошка при вращении детали с порошком, помещенным во внутреннюю полость изделия. Возможен также вариант получения сформованного слоя при свободной засыпке порошка во вращающуюся форму путем распределения его по поверхности основы прямым воздействием формующего инструмента.

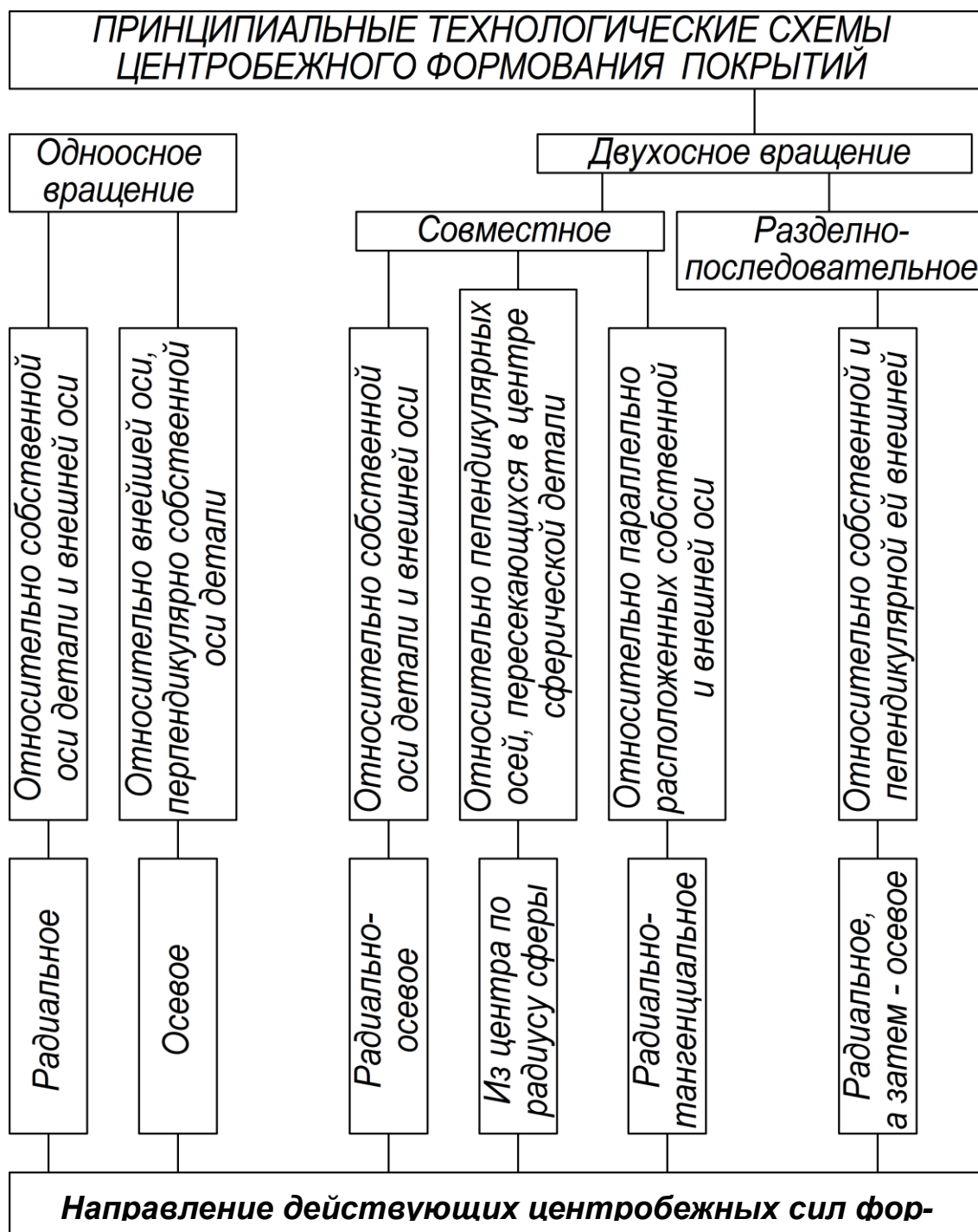


Рисунок 1. Классификация принципиальных технологических схем центробежного формования порошковых покрытий по кинетическому исполнению и направлению действующих сил

Схема нанесения покрытий с внутренним нагревом используется тогда, когда применение схемы с наружным нагревом невозможно в связи с необходимостью предохранения наружной поверхности зубчатого профиля от термического воздействия при восстановлении внутренней поверхности шестерни нанесением покрытия или, когда из-за большой толщины стенки детали (заготовки) наружный нагрев нецелесообразен по

экономическим и прочим соображениям. Рассматриваемая схема нанесения может быть применена для нанесения наплавкой неферромагнитных материалов (бронза, алюминий, твердые сплавы на никелевой основе и т.д.) на чугунные втулки, гильзы и другие детали.

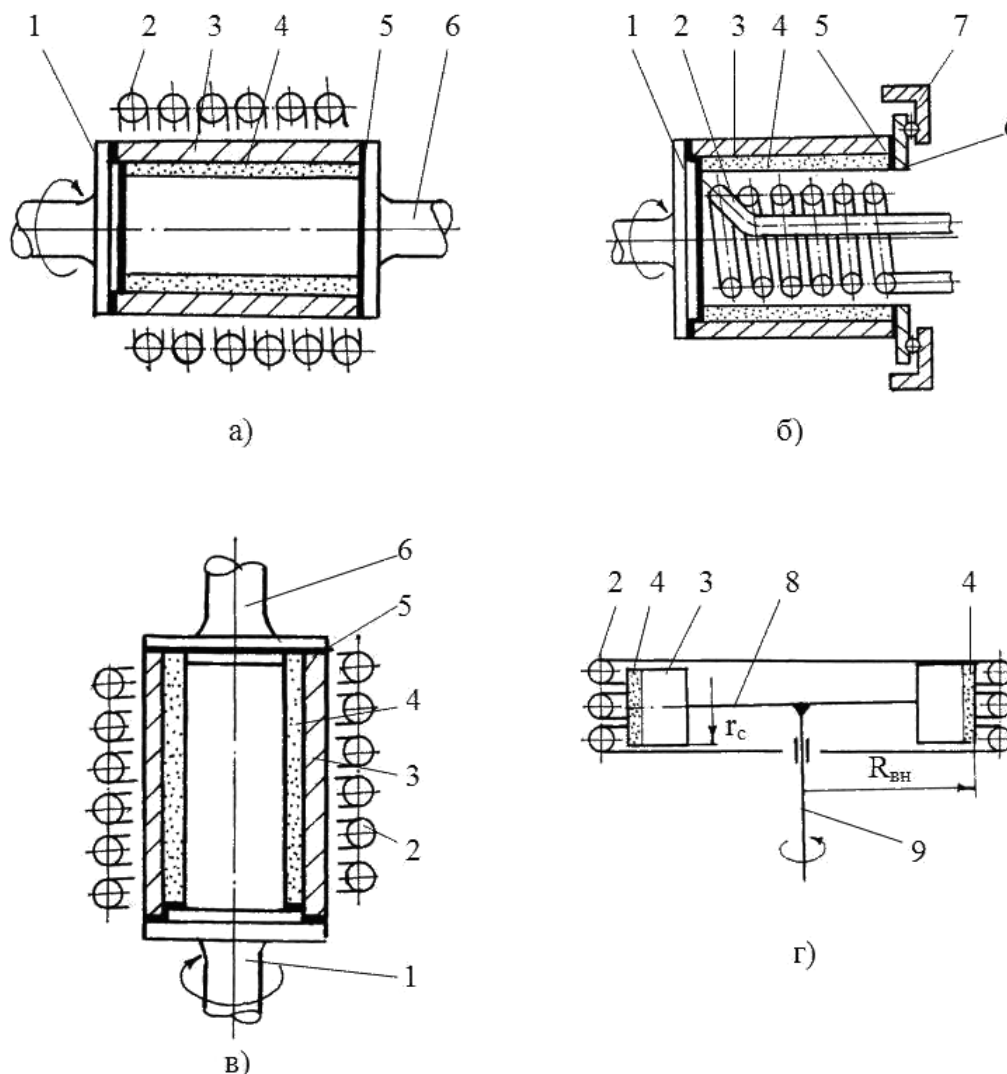


Рисунок 2. Принципиальные схемы центробежного индукционного нанесения покрытий с наружным (а, в, г) и внутренним (б) нагревом, при одноосном вращением заготовки относительно осей: собственной горизонтальной (а, б), вертикальной (в) и внешней (г)

1 – шпиндель центробежной машины; 2 – индуктор; 3 – заготовка;
 4 – наносимый порошок; 5 – прокладка; 6 – опорный диск. 7 – опора;
 8 – собственная ось детали; 9 – внешняя ось вращения, перпендикулярная собственной оси детали

В схеме центробежного индукционного нанесения покрытий, изображенной на рис. 2в, используется вертикальное расположение детали и наружный нагрев. Порошок

перед наплавкой помещают в кольцевой зазор, образованный внутренней поверхностью детали и концентрично расположенной цилиндрической оправкой. Данная технологическая схема наиболее универсальна, так как позволяет осуществлять наплавку порошков, в том числе несферических мелких фракций и композиций на их основе в независимости от их сыпучести, производить объемное дозирование засыпки и формировать покрытия постоянной толщины.

В схеме центробежного нанесения покрытий, показанной на рис. 2, одноосное вращение цилиндрической детали и помещенного в нее порошка осуществлено таким образом, что действие центробежных сил направлено вдоль ее оси. В технологии порошковой металлургии данную схему с осевой направленностью действия центробежных сил весьма эффективно используют для получения методом холодного формования стержней из твердых порошковых материалов. Метод горячего формования под давлением осевых центробежных сил нами предлагается использовать для получения покрытий на плоских и на наружных поверхностях цилиндрических деталей.

Принципиальные технологические схемы центробежного индукционного нанесения с формованием порошка, реализуемого двухосным вращением, приведены на рис. 3.

В схеме рис. 3а совместное вращение относительно собственной оси реализуется с угловой скоростью $\omega_{гс}$, а относительно внешней оси – с угловой скоростью $\omega_{R_{вн}}$. При соответствующем выборе этих неодинаковых угловых скоростей вращения в порошковом слое инициируются разнонаправленные радиально осевые силы, которые образуют криволинейную (полусферическую, полуэллипсоидную и т.д.) форму свободной внутренней поверхности.

Схема формования, изображенная на рис. 3б, представляет собой частный случай исполнения схемы рис. 2а. Внешняя и собственная ось имеет одинаковый радиус, что характерно для сферических деталей. Вращение этой детали относительно одинаковых взаимно пересекаемых радиусов осуществляют с одинаковыми угловыми скоростями. При этом на порошковую засыпку, помещенную во внутреннюю сферическую полость детали, действуют разнонаправленные центробежные силы одинаковой величины, которые образуют сферическую форму поверхности.

В схеме (см. рис.3в) с раздельным вращением детали радиусом r_c относительно собственной оси с угловой скоростью $\omega_{гс}$ и внешней оси радиусом $R_{вн}$ ($R_{вн} \gg r_c$) с угловой скоростью $\omega_{R_{вн}}$ предусматривается два этапа формования. На первом этапе порошковый слой формируют на внутренней цилиндрической или любой другой поверхности детали вращением на малом радиусе r_c с одновременным нагревом. При этом расположение оси детали может быть либо горизонтальное, если используется схема, показанная на рис.2а, либо любое – вертикальное или горизонтальное, если используется схема, изображенная на рис.2в. На втором этапе нагретый и сформованный на внутренней поверхности порошковый слой переформовывают вращением на большем внешнем радиусе $R_{вн}$ в поверхность плоской (рис.3в), цилиндрической (рис.2 в) или другой более сложной конфигурации, соответствующей конфигурации центрального формирующего стержня. В схеме центробежного индукционного припекания (см. рис.3г) с одновременным вращением детали радиусом r_c относительно собственной оси с угловой скоростью $\omega_{гс}$ и параллельной ей внешней оси радиусом $R_{вн}$ с угловой скоростью $\omega_{R_{вн}}$ формование цилиндрических порошковых покрытий реализуется при условии соотношения угловых скоростей вращения, в которых $\omega_{гс} \gg \omega_{R_{вн}}$. При соответствующем подборе

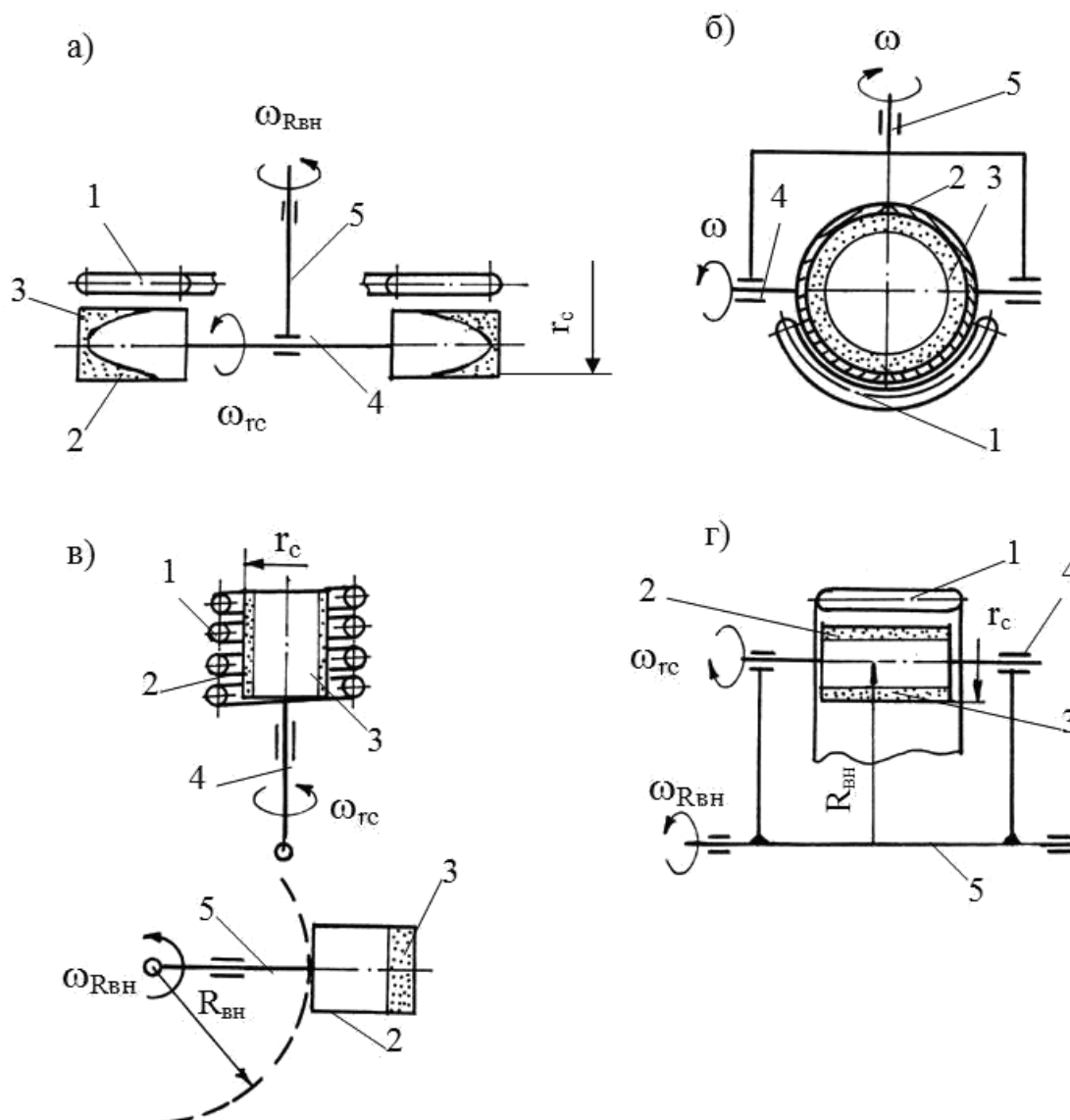


Рисунок 3. Принципиальные схемы центробежного индукционного припекания с формированием порошка, реализуемым двухосным совместным (а, б, г) и раздельным (в) вращением заготовки относительно осей: собственной и внешней (а, в), перпендикулярно пересекающихся в центре сферической детали (б), собственной и параллельной ей внешней (г)

1 – индуктор; 2 – деталь; 3 – порошок; 4 – собственная ось вращения; 5 – внешняя ось вращения

угловых скоростей из порошковой засыпки, помещенной во внутреннюю полость детали, цилиндрический слой формируется радиальными силами, возникающими от вращения детали вокруг собственной оси. При этом тангенциальные силы меньшего значения, возникающие от вращения детали вокруг внешней оси, не искажают геометрии слоя, но улучшают формуемость порошков, так как дополнительно возбуждают в них циркулирующие разнонаправленные силы, которые при холодном формировании разобьют частицы порошка, уменьшают их сцепляемость и, тем самым, улучшают их сыпучесть.

Действие этих сил на связанный слой при горячем формовании равноценно наложению активирующих вибраций в поперечном направлении к сформованному слою.

Таким образом, предложенная классификация центробежного индукционного нанесения порошковых покрытий по кинематическим признакам наиболее точно определяет технологическую сущность процессов нанесения покрытий, так как указывает на направление возбуждаемых сил и способ формования.

3. Разработка универсальных центробежных установок для нанесения покрытий

Универсальные центробежные установки предназначены для организации на заводах различного профиля участков по изготовлению широкой номенклатуры деталей с покрытиями. Поэтому оборудование этого типа должно легко перенастраиваться на работу с заготовками разных типоразмеров по любой из выбранных технологических схем, а также укомплектовываться необходимым набором технологической оснастки и приспособлений. Применение последней необходимо для того, чтобы обеспечить с требуемой производительностью изготовление заготовок с покрытиями в наладочном, механизированном и автоматическом режимах работы с использованием различных источников индукционного нагрева, в том числе, чтобы повысить качество покрытий (однородность свойств в механическом отношении по объему покрытия, прочность сцепления с основой и др.), уменьшить припуски на обработку для эффективной экономии дефицитных материалов. Обладая указанными свойствами, установки этого типа должны отличаться простотой управления.

На разработанном оборудовании обеспечивается возможность двух координатного перемещения заготовки относительно индуктора. Станина, выполненная в виде двух стоек, связанных между собой двумя направляющими, имеют возможность под влиянием привода перемещаться вперед и назад по отношению к рабочему месту оператора. При этом деталь, закрепленная в центрах между каретками, приближается или удаляется от источника тепла. От специального кулисного механизма, взаимодействующего с траверсой, кареткой вместе с деталью и сама траверса, которые смонтированы на трубе, перемещаются вдоль оси детали перпендикулярно указанному выше перемещению станины. Деталь при этом перемещается вдоль индуктора.

Оборудование может работать по схеме нагрева только с поперечным, только с продольным, одновременно с продольным и поперечным перемещениями, а также с применением позиционирования изделия относительно индуктора.

Разработанная универсальная установка (рис. 4) снабжена приводом поперечного перемещения станины, предназначенным для регулирования зазора между (рамочным петлевым или полосовым) индуктором и изделием или для изменения положения детали относительно внутреннего цилиндрического индуктора. Предусмотрена возможность осуществления этих наладок в процессе нагрева, с тем, чтобы обеспечить регулирование подводимой мощности и интенсивности нагрева. Это позволяет более оперативно и гибко управлять температурными параметрами нагрева изделий и, следовательно, получать покрытия требуемого качества.

С помощью механизма возвратно-поступательного перемещения зажимной каретки механизмируются и автоматизируются следующие операции: подвод и отвод каретки на заданную позицию; фиксация и расфиксация каретки в требуемом положении на гильзах салазок; упругое закрепление изделия; раскрепление и сброс изделия после охлаждения.

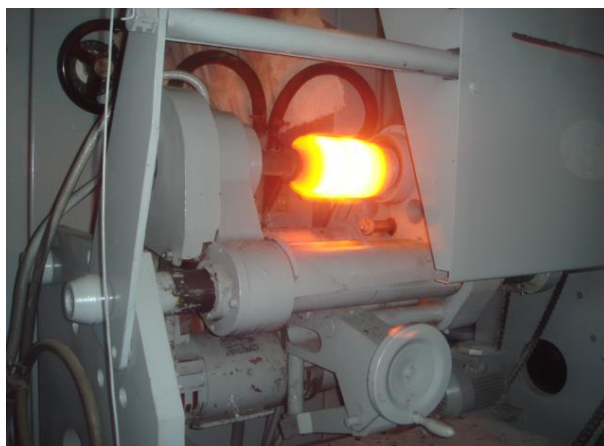


Рисунок 4. Реализация процесса центробежного индукционного формования покрытий на универсальной установке

Этот механизм вместе с салазками предельно упрощает или вовсе исключает переналадку установки при переходе на новый типоразмер.

Механизированный тип установки предусматривает использование приспособления с ручным приводом подъема заготовки на линию центров перед ее закреплением и опускание ее на позицию съема. Управление нагревом реализуется изменением мощности за счет регулировки зазора между индуктором и заготовкой. Автоматизированный тип установки предусматривает подачу и закрепление детали на позицию нагрева производить из накопителя, сброс ее из зоны нагрева производить с замедлением скорости падения. Управление нагревом целесообразно производить с помощью автоматической системы обеспечения заданных режимов нагрева и алгоритмов для автоматизированного поддержания заданного температурного массива.

Различные универсальные центробежные установки, изготавливаемые для внедрения процессов по нанесению покрытий с горизонтальной осью вращения, отличаются между собой элементной базой исполнения приводов (электромеханический, гидравлический и пневматический), степенью автоматизации вспомогательных операций и максимальными размерами вращаемой детали (диаметром и длиной до 500 мм). Наибольшее промышленное применение имеют установки для нанесения покрытий на заготовки средних размеров. Автоматизированные установки указанного назначения изготавливались с электромеханическими и гидравлическими приводами [9-10].

Для изготовления крупногабаритных биметаллических заготовок центробежным индукционным способом нагрев детали выполняют одновременно двумя и более источниками тепла.

4. Заключение

На основании известных и вновь разработанных принципиальных технологических схем центробежного формования порошковых покрытий дана их классификация по кинематическому исполнению, учитывающему направление действующих сил и обеспечивающих под влиянием раздельного действия радиальных, осевых, совместного действия радиально-осевых, радиально-тангенциальных и раздельного последовательного действия радиального и осевого направления сил для получения цилиндрических покрытий на цилиндрических поверхностях, плоских покрытий на торцевых поверхностях и покрытий другой более сложной эллипсоидной и сферической формы.

Разработан ряд универсальных центробежных установок, изготавливаемых для внедрения процессов по нанесению покрытий, отличающихся между собой элементной базой исполнения приводов (электромеханический, гидравлический и пневматический), степенью автоматизации вспомогательных операций и максимальными размерами вращаемой детали (диаметром и длиной до 500 мм). При этом наибольшее промышленное применение имеют установки для нанесения покрытий на заготовки средних размеров.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Белявин, К. Е. Индукционное упрочнение быстроизнашивающихся деталей узлов трения порошковыми покрытиями / К. Е. Белявин, И. А. Сосновский, А. Л. Худолей // Актуальные проблемы прочности: монография. В 2-х т. Т. 1 / под ред. В. В. Рубаника. – Витебск: УО «ВГТУ», 2018. – Гл. 15. – С. 272-290.
2. Дорожкин, Н. Н. Получение покрытий методом припекания / Н. Н. Дорожкин, Т. М. Абрамович, А. И. Жорник – Минск: Наука и техника, 1980. – 176 с.
3. Сосновский, И. А. Контроль и регулирование режимов нагрева в процессе центробежной индукционной наплавки порошковых покрытий / И. А. Сосновский, К. Е. Белявин, М. А. Белоцерковский, А. А. Курилёнок, О. О. Кузнечик // Инновационные технологии, автоматизация и мехатроника в машино- и приборостроении: материалы VI международной научно-практической конференции / ред.кол.: Маляревич А. М. (гл.ред.) [и др.]. – Минск: Бизнесофсет, 2018. – С. 21–22.
4. Белоцерковский, М. А. Технологические особенности изготовления разъемных биметаллических подшипников скольжения, получаемых центробежным индукционным методом / М. А. Белоцерковский, К. Е. Белявин К.Е., И. А. Сосновский, А. Л. Худолей, А. А. Куриленок // Актуальные вопросы машиноведения; сб. научн.тр. / Объедин. ин-т машиностроения НАН Беларуси; редкол.: С.Н. Поддубко [и др.]. – Минск, 2018. – Вып. 7. – С. 134–137.
5. Дорожкин, Н. Н. Центробежное припекание порошковых покрытий при переменных силовых воздействиях / Н. Н. Дорожкин, Л. П. Кашицин, Т. М. Абрамович, И. А. Кирпиченко // Под ред. В. Г. Горобцова. – Минск: Наука и техника, 1993. – 159 с.
6. Белявин, К. Е. Инженерные методы расчета температурно-временных параметров в процессах центробежной индукционной наплавки покрытий / К. Е. Белявин, И. А. Сосновский, А. А. Курилёнок / Перспективные материалы и технологии : монография. В 2-х т. Т. 2 / под ред. чл.-корр. В.В. Рубаника. – Витебск: УО «ВГТУ», 2019. – Гл. 1. – С. 5–18.
7. Немков, В. С. Теория и расчет устройств индукционного нагрева / В. С. Немков, В. Б. Демидович. – Л.: Энергоатомиздат, 1988. – 280 с.
8. Сосновский, И. А. Моделирование процессов индукционной наплавки порошковых покрытий, содержащих наноразмерные модификаторы / И. А. Сосновский [и др.] // Вестник ПГУ, 2016. – Серия В. – № 3. – С. 66–74.
9. Кашицин, Л. П. Центробежное оборудование для нанесения порошковых покрытий / Л. П. Кашицин, А. Л. Худолей // Мир техники и технологий. – 2002. – № 1. – С. 17–21.
10. Кашицин, Л. П. Организация производства биметаллических деталей / Л. П. Кашицин, А. Л. Худолей, И. А. Сосновский, С. Е. Клименко // Мир техники и технологий. – 2002. – № 4. – С. 48–49.

Поступила в редколлегию 05.04.2020 г.

УДК 621.01

А. Н. Михайлов, д-р техн. наук, проф., **Б. С. Котляров**, канд. техн. наук,
В. Б. Котляров, инженер, **С. Б. Котляров**, инженер
Донецкий национальный технический университет, г. Донецк, ДНР
Тел: +38(071) 3060879; +7(985) 0217906, +7(964) 7045362
E-mail: tm@fimm.donntu.org; boris.kotlyarov@mail.ru; velidarkotlarov@mail.ru

ПРОЯВЛЕНИЕ АТРИБУТОВ ДЕТАЛЕЙ МАШИН КАК ФАКТОРОВ РАЗРАБОТКИ ФУНКЦИОНАЛЬНО-ОРИЕНТИРОВАННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

В статье предложен подход к определению множества атрибутов деталей машин (отличительных признаков), основанный на системном представлении объектов, и определяющий необходимые совокупности всех присущих деталям свойств. Такой подход, учитывает особенности проявления всех параметров деталей машин, и рассматривает их в трех взаимосвязанных пространствах: мыслительном (M), семиотическом (C) и реальном-физическом (P) на всех этапах жизненного цикла детали как с оставляющей части машины.

Показана возможность представления конкретных деталей машин со всей совокупностью их атрибутов как выделение частного случая из общей модели.

Ключевые слова: атрибуты, деталь, машина, множество, функция, совокупность свойств; пространства – мыслительное, семиотическое, реальное.

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

MANIFESTATION OF ATTRIBUTES OF PARTS OF MACHINES AS FACTORS OF DEVELOPMENT OF FUNCTIONALLY ORIENTED TECHNOLOGIES

An approach is proposed for determining the set of attributes of machine parts (distinguishing features), using a systematic representation of objects, and determining the necessary sets of all properties inherent in parts, as well as taking into account and representing the features of manifestation of machine parts themselves in three interconnected spaces: mental (M), semiotic (C) and real-physical (P) at all stages of the life cycle of the part as from the rest of the machine.

The possibility of presenting specific details with the totality of their attributes as a separation of a particular case from the general model is shown.

Keywords: attributes, part, machine, set, function, set of properties; spaces - mental, semiotic, real.

1. Введение

Отличительные качественные признаки всех деталей машин, относящиеся к геометрии, свойствам поверхности и материала изделия, функциональному назначению – это атрибуты детали, и независимо от их локализации и функциональных предназначений проявляются в виде свойств, влияющих на взаимосвязи с сопрягаемыми деталями узлов и механизмов в зависимости от состояния объектов, имеющих как более высокий, так и горизонтальный иерархический уровень. Разнообразие атрибутов с течением времени и развитием технологий увеличивается, так как их наличие в материальном теле детали является результатом технологических воздействий, но их классы с общими признаками являются устойчивыми. Рассмотрим атрибуты применительно к деталям коробок переключения передач (КПП).

Переход к знаниевым технологическим и промышленным системам с искусственным интеллектом, получившим существенное развитие в настоящее время, требует решения задачи выделения особых признаков - атрибутов деталей машин во взаимосвязанном виде, пригодном для решения основных технологических, вспомогательных и управленческих задач инновационно-инвестиционного цикла. Вместе с тем существующие методологии и практика создания и использования деталей машин [1, 2, 3]

до настоящего времени не в достаточной степени используют общие модели создания технологий с функциональной направленностью на обеспечение конструкторско-технологических особенностей. Большой частью методы создания деталей основаны на редуцированном подходе, согласно которому атрибуты объектов рассматриваются в каждом конкретном случае на базе индивидуальных моделей, большей частью с простой геометрией поверхностей. Такое положение сдерживает применение современных средств информационных и знаниевых технологий, к числу которых можно отнести и функционально-ориентированные технологии [4, 5, 6]. Создание промышленных систем усложняется и не позволяет выявлять достаточно полные области возможных решений при проектировании новых видов и модернизации существующих образцов техники.

2. Цель и задачи

Целью данной статьи является подтверждение актуальности основ нового подхода к определению атрибутов деталей машин, позволяющего выделить и увязать отличительные признаки (будем называть их - атрибуты), присущие только конкретным деталям машин, как частный случай из общего множества качественных признаков на различных этапах представления инновационно-инвестиционного цикла их жизни. Особо следует отметить наличие топологической и параметрической фрагментарной локализации модификаций деталей в некоторой их части.

Достижение поставленной цели обеспечивается решением следующих задач:

1. Выделить все существенные признаки, являющиеся отличительными для конкретных деталей механизма.
2. Установить способ определения и принадлежность атрибутов детали на протяжении всего жизненного цикла от идеи до реализации на физическом плане и утилизации.
3. Установить способ определения зоны атрибута и координаты его локализации, принимая во внимание и признаки модификации, в пределах тела детали.
4. Установить структурно-параметрическую систему взаимосвязи атрибутов деталей с функционально ориентированными технологическими воздействиями для их реализации на физическом плане.

3. Основное содержание и результаты работы

Предложенный подход к представлению детали является наиболее приспособленным для применения в интеллектуальных компьютерных системах на всех этапах жизненного цикла материальных технических объектов. Объекты проходят цикл от зарождения замысла (идеи) – через проектирование (семиотический уровень) и изготовление (с учетом новых особенностей применяемых технологий от выбора заготовки, различных видов обработки до сборки узлов и изделия), а также эксплуатации и ликвидации (утилизации) машин, представляющих уровень реального материального воплощения идеи и проекта на физическом плане.

Согласно существующим воззрениям [1, 3] и ГОСТ 2.102 деталь есть часть механизма или машины, представляющая целостное образование, характеризующееся единством материала, требуемой формы, размеров и поверхностных свойств. Из этого определения можно выделить множество видов базовых атрибутов, определяющих сущностные свойства детали: целостность, принадлежность к объекту более высокого иерархического ранга, геометрическую форму и размеры, а также поверхностные свой-

ства, функциональное предназначение детали (опора, рычаг, держатель, передача движения, передача энергии и т.д.).

Однако степень полноты полученного множества видов атрибутов при таком подходе является неопределенной и недостаточной для эффективного применения при современном уровне развития машиностроения. Для ее раскрытия можно воспользоваться принципами системного подхода к развивающимся объектам [7, 8].

Прежде всего, следует выделить обобщенные пространства, в которых проявляются детали машин. Это мыслительное (М), семиотическое (С), и реальное (Р) или физическое пространства [6]. В этих пространствах формируются кластеры атрибутов детали:

- в мыслительном – выбранные образы;
- в семиотическом – знаковые модели;
- в реальном – вещественные элементы.

Процесс создания техники, элементарным представителем которой есть деталь, начинается в мыслительном пространстве с представления образа о будущей машине или механизме для осуществления требуемых функций. Реализация объектов мыслительного пространства в современном производстве может произойти только через семиотическое пространство, когда образ вместе с закладываемыми в него свойствами детали получает свое отражение на каком-либо носителе в виде чертежей, эскизов, текстовых описаний, электронных или голографических изображений или иных форм, достаточных для материального воплощения представленного объекта.

Во всех указанных выше пространствах могут формироваться также информационно-энерго-вещественные кластеры объектов, связанных с деталями машин, в виде отражений (следов), а также полученных на основе процедур рефлексии более сложных чувственно-мыслительных объектов с помощью органов чувств, имеющих или вновь создаваемых технических средств.

Последовательность переходов создаваемых объектов-деталей, из пространства М в пространство Р через пространство С диктует порядок прохождения, связанный с этими пространствами жизненных циклов технических средств [7, 9].

Этап конструирования определяет переход возникшей идеи от мыслительного (М) пространства к семиотическому (С) – знаковому пространству; этап производства отражает переход от семиотического (С) к физическому (Р) пространству, где осуществляется эксплуатация и ликвидация детали и машины после окончания их жизненного цикла.

Конструирование, подготовка производства, собственно изготовление с технологическим обеспечением, эксплуатация и ликвидация деталей машин определяет базовые инварианты процессов искусственных объектов.

Базовому процессу всегда сопутствует информационно-управленческий и плановый материально обеспечивающий процессы, включающие в себя на низших иерархических уровнях материально-технические и организационно-информационные затраты.

Детали в конкретно рассматриваемых технических системах, машинах, узлах и механизмах осуществляют однозначно заданную, присущую и определенную в представляемой машине функциональную роль и значимость. Это заложено в образах мыслительного (М) и отражается в знаках и символах семиотического (С) пространства. Уровень проявления знаков семиотического пространства должен быть доступным и достаточным для реализации на физическом уровне путем реализации технологического воздействия на материал заготовки, придающих деталям необходимые свойства.

Свойства деталей, полученные на материальном плане посредством реализации выбранных технологических процессов, в свою очередь могут быть проявлены через определенные атрибуты. Каждый вид атрибута имеет свою локализацию в теле детали, которую можно определить с помощью прямоугольной или полярной системы координат.

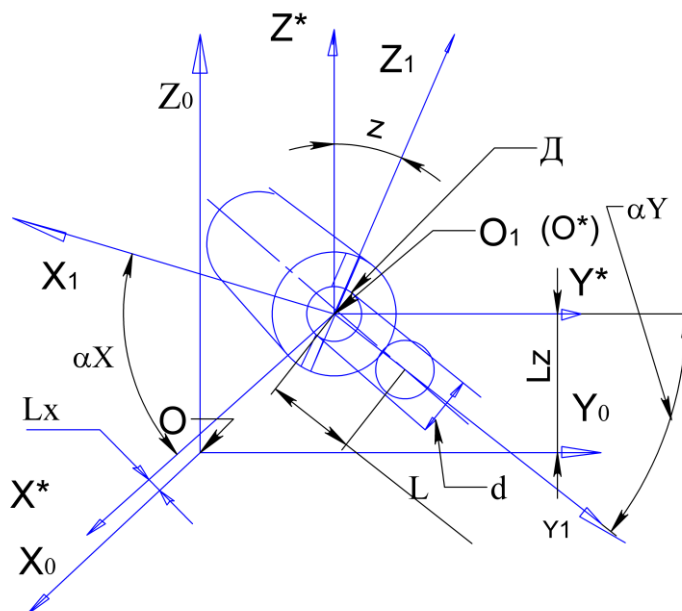


Рисунок 1. Системы координат S и S* для детали Д.

Введем прямоугольные системы координат $S_0\{X_0, Y_0, Z_0\}$ общую с началом в точке O и $S_1\{X_1, Y_1, Z_1\}$ частную, разместив в них деталь D (рис. 1).

Введенные системы координат позволяют определить возможные виды пространственно-временных атрибутов детали.

Введем атрибут вида aI – для определения координаты детали в общей и частной системах координат. Связь обеспечивается через задание матрицы \tilde{M}_c преобразования координат частной системы в общую систему $\tilde{M} \Sigma$ и вектора \vec{Z}_c частной системы координат в вектор \vec{Z} общей системы координат [9] для элемента детали D с размерами $D, D1, D2, D3, L$ и d , которая состоит из элементарных объемов материала с размерами $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$, измеряемыми в направлении соответствующих осей координат.

Тогда положение элемента в системе координат можно выразить матрицей вида:

$$R_x(\alpha) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & b & a & 0 \\ 0 & -a & b & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, R_y(\alpha) = \begin{bmatrix} b & 0 & -a & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ a & 0 & b & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, R_z(\alpha) = \begin{bmatrix} b & a & 0 & 0 \\ -a & b & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где α – угол поворота частной системы координат с началом в точке $O1$ относительно общей системы координат с началом в точке O ; $a = \sin \alpha$, $b = \cos \alpha$. Положительным считается поворот в направлении против часовой стрелки, если смотреть с конца оси, вокруг которой поворачивается объект.

Этот вид атрибута однозначно задает пространственное положение рассматриваемой детали относительно других деталей в объектах более высокого иерархического уровня, например, в координатной системе машины.

Очевидно, что матрица $\tilde{M}_{чΣ}$ и вектор $\vec{Z}_ч$ являются формами семиотического пространства, отражающими образы мыслительного пространства, изменяющиеся во времени (атрибут детали вида $a2$).

В частной системе координат $S1$ (центр $O1$) деталь задается в виде матрицы, и отражается в общей системе координат (с центром O) в виде многопараметрических аффинных отображений [9, 10].

Тем самым детализируется атрибут вида $a3$ – отражающих геометрию, форму и размеры детали. При этом способ задания геометрии поверхности может быть представлен в любых выражениях, и он должен отражать развитие во времени – указывать на объемные параметры, свойства поверхности, показатели точности изготовления и тенденции их изменения.

Очевидно, что при одной и той же геометрии у детали могут быть разные поверхностные свойства (атрибут вида $a4$), а также различные полевые свойства, т. е. свойства внутреннего состояния материала детали (атрибут вида $a5$).

Данные свойства проявляются в реальном пространстве, и являются важными факторами в сферах жизненного цикла – конструирования, производства, использования и эксплуатации, включающего весь комплекс оборудования для реализации процессов технологического воздействия, и утилизации.

Исходя из иерархического соотношения триады [9] устанавливаются следующие виды атрибутов для различных уровней:

$a6$ – для представления детали как части механизма или машины;

$a7$ – для отражения инфраструктуры детали.

Учитывая триаду развития устанавливаются атрибуты видов:

$a8$ – о заготовке детали;

$a9$ – о системах, производящих деталь.

Необходимо учитывать другие виды атрибутов, вытекающие из триады развития и связанные с ранее введенными атрибутами видов $a3$, $a4$, $a5$, и другие, которые отражают текущее (настоящее) время проявления детали в физическом пространстве.

Если атрибуты $a8$, $a9$ отражают прошлое по отношению к проявлению в пространстве (P) детали, то информация (атрибут вида $a10$) о том, где будет использоваться деталь, отражает будущее.

Триада самодостаточности цикла позволяет установить ряд дополнительных видов атрибутов, необходимых для решения задач управления и осуществления обеспечивающих действий – планирование, логистика, информация и др.

К ним можно отнести проявление в мыслительном и (или) семиотическом пространствах виды атрибутов о субъекте управления и документов ($a11$), о субъекте обеспечения ($a12$) и способе взаимодействий ($a13$). Этот вид атрибута может отражать такие свойства деталей, как химическая стойкость, магнитопроницаемость, токопроводимость, инерционность свойств и другие.

Информационным видом атрибута $a14$ можно считать атрибут отражения в знаковых выражениях (C) детали как части ($a13$).

Указанные атрибуты могут быть представлены систематизированными по способности к проявлениям в пространствах разных видов и применительно к различным этапам жизненного цикла так, как показано в табл. 1. При этом атрибуты более высоко-

го уровня включают в себя атрибуты нижних уровней во всем их разнообразии и с частными ограничениями.

На основании указанных общих множеств видов атрибутов можно определить конкретные атрибуты для конкретных деталей КПП.

Таблица 1. – Структура соответствия атрибутов детали и технологий

Атрибуты конструктивные и технологические		Пространства проявления атрибутов детали в сферах жизненного цикла и во времени (материалы, формы, поверхности, энергия)		
ai детали	ti технологии	Прошлое (П)	Настоящее (Н)	Будущее (Б)
a1	t1-i	М, С	Р	М, С
a2	t2-k	М, С	Р	М, С
a3	t3-l	М, С	Р	М, С
a4	t4-m	М, С	Р	М, С
a5	t5-n	М, С	Р	М, С
a6	t6-p	М, С	Р	М, С
a7	t7-q	М, С	Р	М, С
a8	t8-r	М, С	Р	М, С
a9	t9-s	М, С	--	--
a10	t10-a	М, С	--	--
a11	t11-b	--	--	М, С
a12	t12-d	М, С	Р	М, С
a13	t13-f	М, С	Р	М, С
a14	t14-g	М, С	Р	М, С

Наличие множества атрибутов указанных видов говорит об инвариантности (изоморфности) структуры множества видов атрибутов для деталей машин как искусственных образований. Однако на уровне проектирования конкретных изделий вариативность определяется набором атрибутов детали в сочетании со свойствами технологической производящей системы. Принимая во внимание то обстоятельство, что атрибуты детали с заданными параметрами могут быть реализованы только с помощью выбранного из некоторого ограниченного множества вариантов технологических воздействий: с помощью инструментов или введения совершенно определенным образом энергий, то каждому атрибуту рассматриваемой детали должно быть поставлено в соответствие некоторое множество частных технологий $t \in \sum i$. Из этого множества технологий необходимо выбрать то технологическое воздействие, которое оптимальным образом соответствует изготовлению детали с заданными параметрами и в допустимых пределах качественных показателей и материальных затрат в зависимости от вида производства и имеющихся ресурсов. Под видом производства здесь понимается количество необходимых деталей (программа и график выпуска деталей), а под ресурсами – имеющееся в наличии на действующем предприятии оборудование и инструменты, энергетическая обеспеченность и возможность применения новых технологий на современных принципах (плазменные, лазерные и т. д.) в каком-то определенном промежутке времени.

Исходя из указанных предпосылок, при проектировании детали выбирается материал (это может быть металл, пластик, композит и т. д. согласно КД). После выбора

материала, обеспечивающего по своим физико-механическим характеристикам функциональные задачи детали в узле, выбирается вид формирования геометрии детали из заготовки. Сама заготовка может быть получена литьем, обработкой давлением, отрезанием из сортового проката, спеканием, методом 3D-печати, прототайпинга и др. Так на каждой операции формообразования и придания заданных свойств детали по поверхностным участкам и по зонам, распределенным внутри детали, выбирается некоторое функциональное соответствие и экономические факторы при изготовлении. При этом проявляться они могут в разных пространствах: М, С, и Р как в прошлом, так и в настоящем и будущем времени.

В таблице индексы при обозначении t технологии указывают на вариативность, наличие нескольких технологий, способных в достаточной степени обеспечить принципиально достижимый результат по реализации параметров, т. е. функций разрабатываемой детали в существующих производственных условиях.

Расположение систем координат элементов для эксцентриковой планшайбы, разработанной КПП без разрыва пот ока мощности представлено на рис. 2.

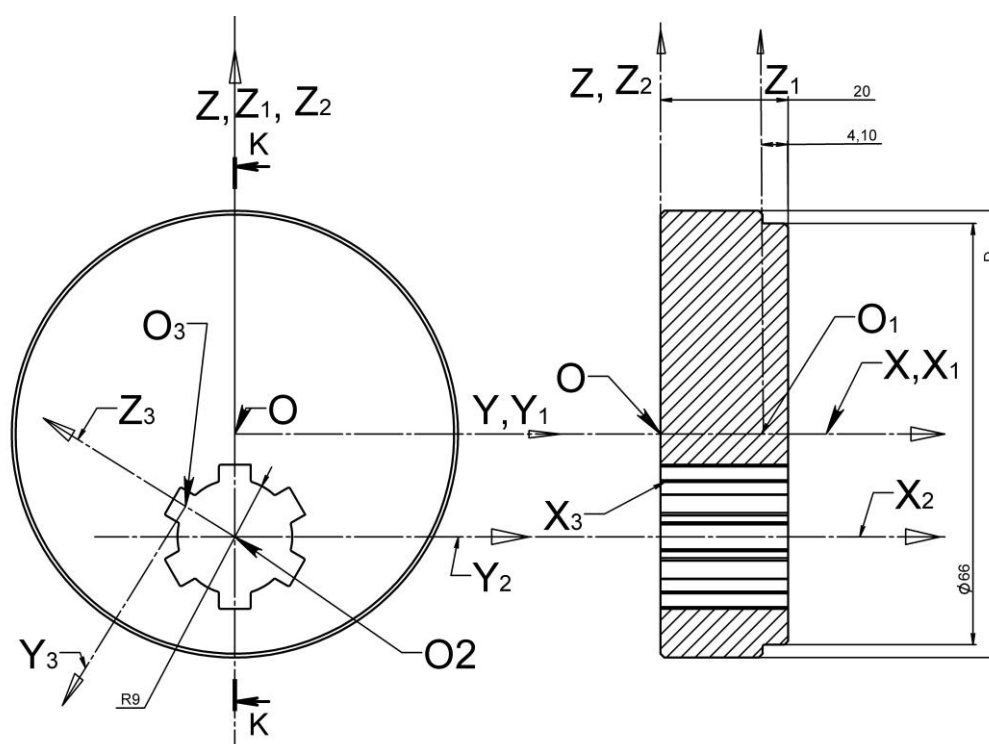


Рисунок 2. Расположение систем координат на элементах планшайбы.

Общая система координат с центром в точке O , частные системы $S1\{X1, Y1, Z1\}$ с центром $O1$, $S2\{X2, Y2, Z2\}$ с центром $O2$, и $S3\{X3, Y3, Z3\}$ с центром $O3$. Каждая частная $Si\{Xi, Yi, Zi\}$ система координат определяет положение каждой i -ой частицы элемента детали с размерами Δx , Δy , Δz в своей системе, а начало каждой частной $Si\{Xi, Yi, Zi\}$ системы определяется в общей системе $S\{X, Y, Z\}$ детали. Смещение по осям координат для i -ой системы определяется величинами ΔxSi , ΔySi , ΔzSi от центра системы Oi до центра системы S точки O . На приведенном примере частные системы $S3$ относятся к определенному множеству (6 шлицев), поэтому иерархически эти системы

имеют дополнительные индексы на более низком уровне и отличаются углом αz_i поворота относительно оси Z_2 при совпадающем направлении осей X и Y . Частная система может быть выражена и в полярных координатах, но для более простого представления примем декартову систему координат.

Все материальные точки планшайбы с размерами Δx , Δy , Δz заключены в объемах, ограниченных поверхностями, точки которых определены в частных системах координат, включая фаски, галтели, скругления.

Весь объем материала планшайбы можно в реальном пространстве (Р) представить в виде множества материальных точек с объемом $\Delta x * \Delta y * \Delta z$, заполняющих пространство между замкнутыми поверхностями планшайбы, определяемыми диаметрами D , $D1$, $D2$ и линейными размерами L , $L1$, а также поверхностями фасок, скруглений. Координаты начала частных координатных систем определяются в семантическом пространстве (С) линейными координатными размерами в общей системе S : X_{O1}, Y_{O1}, Z_{O1} – для системы $S1$; X_{O2}, Y_{O2}, Z_{O2} – для системы $S2$; X_{O3}, Y_{O3}, Z_{O3} – для системы $S3$. В каждой S_i -ой системе координат любая j -я точка имеет локализацию K_j в своей системе координат как функция $K_j = f(x_j, y_j, z_j)$. Все материальные точки каждого элемента в своей системе координат являются определенными. Используя метод аффинных преобразований координатных систем каждая точка пространства может быть определена в значениях общей системы координат S . Значит, при наличии определенного и необходимого достаточного инструментария в любую точку детали можно доставить необходимое дозированное информационное, материальное и энергетическое технологическое воздействие, обеспечивающее достижение заданных документацией параметров формы, свойств материала и поверхностей детали.

Руководствуясь ранее разработанными основными принципами создания функционально-ориентированных технологий [4] можно выделить на разных иерархических уровнях технологические операции, начиная с заготовительной и заканчивая финишной для каждой детали КПП.

Например, для предложенной ранее к рассмотрению детали КПП планшайба эксцентриковая шлицевая (рис. 2), логика и процесс реализации в пространстве (Р) выражается цепочкой выражений в пространстве (С), которые последовательно отражают все подмножества конструкторско-технологических параметров (атрибуты акр) детали и функционально-ориентированных и дозированных технологических воздействий на заготовки (атрибуты t_{sq}) для получения готовой детали. Так на этапе подготовки производства можно выразить комплексный атрибут a_{nn} путем учета частных атрибутов a_{nni} и t_{nnj} :

a_{nn1} – массовые характеристики заготовки;

a_{nn2} – габаритные размеры заготовки с учетом припусков на обработку;

a_{nn3} – марка материала детали;

a_{nn4} – тип производства (единичное, серийное, массовое);

a_{nn5} – требования по получению заготовки;

t_{nn1} – плановая или внеплановая работа;

t_{nn2} – бюджет разрабатываемой темы;

t_{nn3} – сроки проведения работы;

t_{nn4} – выбор способа получения заготовки в зависимости от возможностей;
 t_{nn5} – показатель логистики, наличия материала на складах;
 t_{nn6} – наличие оборудования для отрезки или формообразования заготовки нужных размеров;
 t_{nn7} – наличие разработанного техпроцесса –маршрутного или операционного изготовления детали;
 t_{nn8} – наличие техоснастки, приспособлений и инструментов;
 t_{nn9} – наличие работников необходимой квалификации (человеческий фактор);
 t_{nn10} – наличие контрольно-измерительного комплекта инструментов;
 t_{nn11} – выходная логистика операции (складирование и перемещение заготовок и полуфабрикатов на следующие операции механообработки, финишные и др.).
 Множество вида

$$a_{nn\Sigma} = \{a_{nn1}, a_{nn2}, a_{nn3}, a_{nn4}, a_{nn5}, \dots\} \quad (2)$$

отражает комплекс конструктивных параметров, а множество вида

$$t_{nn\Sigma} = \{t_{nn1}, t_{nn2}, t_{nn3}, \dots, t_{nn10}, t_{nn11}\} \quad (3)$$

отражает полный комплекс технологических функциональных мероприятий и действий на этапе подготовки производства. Полный комплекс атрибутов $A_{nn\Sigma}$ в пространстве (C), отражающий все необходимые действия в пространстве (P) выражается конъюнкцией выражений (2) и (3) вида:

$$A_{nn\Sigma} = a_{nn\Sigma} \wedge t_{nn\Sigma} \quad (4)$$

Аналогично выражению (4) рассматривается комплекс $A_{3\Sigma}$ всех параметров деталей, технологических действий на заготовительной операции:

$$A_{3\Sigma} = a_{3\Sigma} \wedge t_{3\Sigma}, \quad (5)$$

где $a_{3\Sigma} = \{a_{31}, a_{32}, \dots, a_{3i}\}$, конструктивные атрибуты детали $a_{31}, a_{32}, \dots, a_{3i}$ – отражают символические требования КД, учитывающие размеры, массу, наличие особых требований к заготовке, марку материала.

Выражение $t_{3\Sigma} = \{t_{31}, t_{32}, \dots, t_{3j}\}$ в пространстве (C) отражает, мероприятия и технологические аспекты действий на заготовительной операции, например, наличие необходимого отрезного или формообразующего оборудования, технологической оснастки и инструмента, наличие операционного техпроцесса, планирование запуска в работу, обеспечение режимов обработки, решение логистических вопросов, документального оформления, управления и информационного обеспечения и т. д.

При необходимости термообработки по всему объему детали можно привести выражение полного геометрического множества с приданием технологического воз-

действия с помощью температуры и закаливания или отпуска; при поверхностной термообработке, например, азотировании, воздействию подвергается множество на определенную глубину от поверхностного слоя, определяемое в координатах каждой принадлежащей подмножеству точки B_i в зоне пересечения по поверхности размера $(r_n - \Delta s)$, где Δs – глубина слоя азотирования. При необходимости нанесения гальванопокрытия, напыления или нанесения иного вида защитного покрытия любой природы по происхождению определяется геометрическое множество по поверхности наружного диаметра r_n с добавлением толщины β слоя покрытия. При необходимости воздействия полем на определенную глубину детали рассчитывается сила полевого воздействия достаточной напряженности и выделяется подмножество материальных точек тела детали на необходимой глубине и по необходимой длине.

Аналогичным образом в соответствие конструктивным требованиям приводится весь комплекс решений технологических и организационных мероприятий по каждой выполняемой операции в иерархической последовательности.

Мощность этого множества будет зависеть не только от количества параметров детали и количества операций, но и от размера Δx , Δy и Δz выбранного минимального объема представляемой частички детали, продиктованного конкретными условиями.

Поскольку геометрически весь объем детали определен, то каждой точке тела втулки становится присущим набор определенных качественных показателей, выраженных через атрибуты согласно табл. 1.

Тогда рассмотренная выше деталь эксцентриковая планшайба может быть представлена выражением множества в виде Декартова произведения.

Обозначим множество A геометрических точек b_i тела детали «планшайба» как множество точек $b_{i\Sigma}$ в координатах X, Y, Z , принадлежащих множеству A_2 :

$$b_{i\Sigma XYZ} \in A_2$$

Подмножества $a_{1XYZ}, a_{2XYZ}, \dots, a_{iXYZ}$ по параметрам детали в координатах X, Y, Z включены в подмножество A по геометрии, но не пересекаются по своим характеристикам между собою и с множеством A_2 :

$$a_{1XYZ} \in a_1; a_{2XYZ} \in a_2; a_{iXYZ} \in a_i.$$

Тогда $A_1 \supset a_1; A_2 \supset a_2; A_i \supset a_i$.

Но с этими подмножествами находятся в соответствии технологические подмножества t_k , причем выбор технологического воздействия по каждому атрибуту a_i производится из выборки (подмножества) t_k , своего для каждого a_i .

$$a_1 \rightarrow t_{1k}; a_2 \rightarrow t_{2k}; a_i \rightarrow t_{ik}.$$

А все подмножества t_{ik} входят в обобщенное подмножество T_k технологии:

$$\{t_{1k} \cap t_{2k} \cap \dots \cap t_{ik}\} \in T_k.$$

В то же время атрибуты a_1, a_2, \dots, a_i являются функциями технологий t_k , т.е.

$$a_1 = f(t_{1k}); a_2 = f(t_{2k}); \dots; a_i = f(t_{ik}).$$

Множество A представляется как произведение множества частных атрибутов и множества выбранных технологий:

$$A = A_i * T_k.$$

Мощность множества A при изготовлении различных деталей зависит в каждом рассматриваемом случае не только от характеристик, предназначенных для готовой детали, но и от числа наличествующих репрезентативных технологий на каждом технологическом переделе на данном производстве.

Замкнутость множества элементов структуры атрибутов вытекает из того, что эти элементы определены на основе презентативной триады триад [7, 9], а количество представителей выборок всегда конечно.

Сравнение полученной структуры атрибутов с традиционной системой показателей, которая учитывала геометрические, поверхностные и инфраструктурные свойства детали машин, показывает существенные отличия их как в количественном, так и в качественном планах.

Замкнутость множества видов атрибутов позволяет подойти к постановке и решению в унифицированном виде задач анализа, синтеза деталей машин, а также оптимального вида функционально ориентированных технологических воздействий на всех этапах изготовления деталей. На всех операциях функциональное назначение деталей проявляется в разной степени четкости и выражается выбором инструментов, оборудования, рабочих сред, информационного обеспечения в семиотическом пространстве.

4. Заключение

1. Новый подход к определению атрибутов деталей машин, основанный на учете системных свойств объектов и возможности представления их на основе триады триад структур, позволяет определить полное множество общих атрибутов деталей машин в общем виде. В реальном пространстве (P) атрибуты реализуются путем преобразования знаков в семиотическом пространстве (C), отражающего идеи пространства (M) с учетом их особенностей, отличительных свойств и всех существенных признаков.

Из всего множества частные атрибуты детали, включая модификации элементов, реализуются на физическом плане путем использования процедуры конкретизации.

2. Определен инвариант структуры множества видов атрибутов, проявляющихся в разных пространствах: мыслительном, семиотическом и реальном. Установлена вариативность множества видов атрибутов по топологической, функциональной и пространственной принадлежности, и применяется для решения задач анализа и синтеза на всех этапах инновационно-инвестиционного цикла.

3. На каждом уровне иерархической модели атрибутов [11] установлены зоны их локализации и способ их определения, рассматриваются горизонтальные связи при выборе взаимодействия атрибута с внешними факторами, и отражающие наиболее подходящие по достижимому эффекту на данном этапе жизненного цикла информационные, организационные, технологические, информационные аспекты.

4. На каждом уровне иерархической модели атрибутов существуют функционально ориентированные ограниченные подмножества технологий, в наибольшей степени соответствующих достижению качественных характеристик атрибутов деталей, которые и обеспечивают в реальном пространстве достижение установленных в семиотическом пространстве показателей качества изделий.

Решение частных задач создания техники с заданными свойствами решается путем конкретизации и детализации атрибутов на более глубоких иерархических подуровнях с применяемыми технологическими воздействиями, просчитанными по режимам, мощности и длительности воздействий.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Артоболевский, И. И. Тория механизмов и машин / И. И. Артоболевский – М.: Наука, 1975.
2. Норенков, И. П. Основы автоматизированного проектирования / И. П. Норенков – М.: Издательство МГТУ, 2002.
3. Политехнический словарь. / Ред. И.И. Артоболевский. - М.: Советская энциклопедия, 1975.
4. Михайлов, А. Н. Основы синтеза функционально-ориентированных технологий машиностроения / А.Н. Михайлов – Донецк: ДонНТУ, 2009. – 346 с.
5. Суслов, А. Г. Основы технологии машиностроения. Учебник / А. Г. Сусло – М.: КноРус, | 2016.
6. Ситников, А. А. Проектирование технологических процессов изготовления и ремонта деталей с износостойкими покрытиями / А. А. Ситников, А. В. Собачкин, Ю. Н. Камышов // Журнал «Наукоемкие технологии в машиностроении». – 2019. – №2(92).
7. Беловол, А. В. Общие структурные модели машиностроительных технологических систем / А. В. Беловол и [др.] // Вестник Национального технического университета «ХПИ». – 2005. – Вып. 23. – С. 17-24.
8. Бахтияров, О. Г. Постинформационные технологии. Введение в психонетику / О. Г. Бахтияров – Киев: «Экспир», 1997.
9. Перепелица, Б. А. Разработка теории формообразования и проектирования режущих инструментов на основе многопараметрических отображений: дис.... д-ра. техн. наук / Б.А. Перепелица. – Харьков: ХПИ, 1981.
10. Создание теории унифицированной многопараметрической информационной базы для CAD/CAM систем зубчатых зацеплений, инструментов и процессов зубообработки : отчет о НИР (заключит.) / Б. А. Перепелица, В. А. Доброскок. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2009. – 452 с. – № ГР 0108U001445. – Инв. № 0210U001273.
11. Тернюк, Н. Э. Уровни и способы вариативности технических систем (ГП Институт машин и систем / Н. Э. Тернюк и [др.] // Вісник національного технічного університету «ХПІ». – Харьков: НТУ «ХПИ», 2008. – С. 10-16.

Поступила в редколлегию 15.04.2020

УДК 621.45.0.002.2(075.8)

¹ Д. А. Михайлов, канд. техн. наук, доц., ² В. А. Михайлов, инженер,¹ Е. А. Шейко, канд. техн. наук, доц., ² А. Н. Михайлов, д-р техн. наук, проф.¹ ГОУВПО «Донецкая академия гражданской защиты», г. Донецк, ДНР² ГОУВПО «Донецкий национальный технический университет», г. Донецк, ДНРТел.: +38 071 3060879; E-mail: mntk21@mail.ru

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ МНОГОСЛОЙНЫХ ФУНКЦИОНАЛЬНО-ОРИЕНТИРОВАННЫХ ПОКРЫТИЙ ЛОПАТОК ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

В представленной работе разработано технологическое обеспечение для формирования геометрических параметров слоев многослойного функционально-ориентированного покрытия лопаток газотурбинного двигателя. Для решения этих вопросов в работе разработан ряд специальных методов формирования функционально-ориентированного покрытия лопаток. Разработан метод и алгоритм реализации пространственного контура границ каждого слоя данного покрытия. Многослойное функционально-ориентированное покрытие лопаток позволяет решать вопросы повышения ресурса авиационных газотурбинных двигателей.

Ключевые слова: газотурбинный двигатель, лопатка, свойства, функционально-ориентированное покрытие, многослойное покрытие, пространственный контур границ слоя.

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

FEATURES OF FORMATION OF PARAMETERS OF MULTILAYER FUNCTIONALLY-ORIENTED COVERINGS OF BLADES OF GAS-TURBINE ENGINES

In the presented work, technological support was developed for the formation of the geometric parameters of the layers of a multilayer functionally oriented coating of the blades of a gas turbine engine. To address these issues, a number of special methods have been developed in the work for the formation of a functionally oriented coating of the blades. A method and algorithm for the implementation of the spatial contour of the boundaries of each layer of a given coating is developed. The multilayer functional-oriented coating of the blades allows solving the issues of increasing the resource of aviation gas turbine engines.

Keywords: gas turbine engine, blade, properties, functionally oriented coating, multilayer coating, spatial contour of the layer boundaries

1. Введение

В настоящее время для повышения ресурса лопаток газотурбинных двигателей (ГТД) широко используют различные виды износостойких покрытий [1, 2]. Эти покрытия существенно повышают износостойкость лопаток компрессора и турбины в условиях действия абразивно-эрозионных, термических, физических, химических и других видов эксплуатационных воздействий [1, 3].

Для лопаток компрессора ГТД, где действует значительный абразивно-эрозионный износ при небольших температурных воздействиях среды, обычно применяют однослойные или многослойные износостойкие вакуумно-плазменные композиционные покрытия, образуемые посредством химических и плазмохимических процессов, называемые в мировой практике *PVD* (*Physical vapor deposition*). Для лопаток турбины и свободной турбины применяют специальные абразивостойкие, температуростойкие, температурозащитные и другие виды защитных многослойных покрытий, создаваемых на основе композиции различных материалов.

Следует отметить, что на все виды лопаток ГТД обычно наносятся покрытия,

как однослойные, так и многослойные, одинаковой толщины [1, 3]. При этом в процессе эксплуатации ГТД на лопатки, группы лопаток и подсистемы лопаток (компрессор, турбина) действуют неравномерные эксплуатационные воздействия. Это обусловлено особенностями формы лопатки, ее расположением в подсистеме, кинематикой движения, особенностями движения воздушно-абразивного потока по тракту двигателя и другими процессами. Возникающие неравномерные воздействия приводят к неодинаковому износу зон поверхностей лопаток, лопаток в группах и лопаток в компрессоре и турбине, что приводит к преждевременному выходу их из строя, снижению уровня ремонтпригодности лопаток и снижению технико-экономических показателей ГТД [4, 5, 6].

В работах [4, 5, 6] предложено для выравнивания неравномерного и неодинакового износа лопаток ГТД, а именно поверхностей лопаток, лопаток в группах и групп лопаток относительно друг друга, применять многослойные функционально-ориентированные покрытия (ФОП). Многослойное ФОП это специальное покрытие, которое позволяет исключить неравномерность износа пера лопатки, лопаток в группе и групп лопаток относительно друг друга. Это повышает ресурс ГТД, ремонтпригодность лопаток и технико-экономические показатели эксплуатации авиационного двигателя.

Можно отметить, что для реализации ФОП лопаток ГТД разработан ряд технологий [3, 4] и способов формирования ФОП [4, 6, 7, 8]. Однако вопрос формирования пространственного контура границ (ПКГ) каждого слоя многослойных ФОП остается недостаточно изученным в этих работах. Поэтому в данной работе будут более детально рассмотрены вопросы формирования многослойного ФОП лопаток с учетом особенностей износа лопатки, формирования технологического обеспечения с заданным ПКГ элементов и вариантов их реализации.

Целью данной работы является создание технологического обеспечения для реализации геометрических параметров слоев многослойного ФОП лопаток ГТД на основе анализа особенностей износа покрытий при эксплуатации лопаток, разработки методики и алгоритма реализации ПКГ слоев покрытий путем синтеза способов формирования этих покрытий.

В соответствии с поставленной целью в работе определены следующие задачи:

- выполнить анализ особенностей формирования ПКГ износа покрытий лопаток и ПКГ слоев многослойного ФОП;
- разработать алгоритм реализации технологического процесса формирования многослойного ФОП с ПКГ каждого слоя;
- предложить методику определения геометрических параметров ПКГ многослойного ФОП лопаток.

Эти задачи решаются в данной работе.

2. Особенности формирования ПКГ слоев многослойного ФОП лопаток

При реализации многослойного ФОП возникает необходимость формирования ПКГ каждого слоя. Этот вопрос может решаться двумя способами:

1. Посредством использования специального способа нанесения рельефного покрытия, предложенного в работе [7].
2. За счет применения специального алгоритма и экранов, с помощью которых формируется многослойное ФОП и ПКГ каждого слоя [8].

Можно отметить, что вопрос формирования многослойного ФОП за счет применения специального алгоритма и экранов [8] рассмотрен более детально в работе [6].

Поэтому далее, рассмотрим вопрос реализации ПКГ ФОП на основе разработанного второго способа нанесения рельефного покрытия, предложенного в работе [7].

Этот способ нанесения нитрида титанового покрытия с ПКГ выполняется посредством размещения на поверхности пера лопатки компрессора трафарета, который изготавливается таким образом, что при его установке на перо лопатки, элементы трафарета располагаются там, где необходимо наносить покрытие, при этом на свободную от элементов трафарета часть поверхности пера лопатки наносят сажевую маску, например, методом копчения, потом трафарет снимают и выполняют нанесение нитрида титанового покрытия на всю свободную поверхность пера лопатки и поверхность сажевой маски, после чего удаляют нитрид титановое покрытие с поверхности сажевой маски вместе с сажей. Таким образом, применяя этот способ можно реализовать 1-й слой ФОП с заданным своим 1-м ПКГ слоя, затем - 2-й слой ФОП с заданным 2-м ПКГ слоя, и так далее, пока не будет реализован n -й слой ФОП с заданным n -м ПКГ слоя.

Технологический процесс формирования ФОП пера лопатки с применением разработанного способа реализации ПКГ каждого слоя покрытия выполняется в три этапа (рисунок 1) [7]:

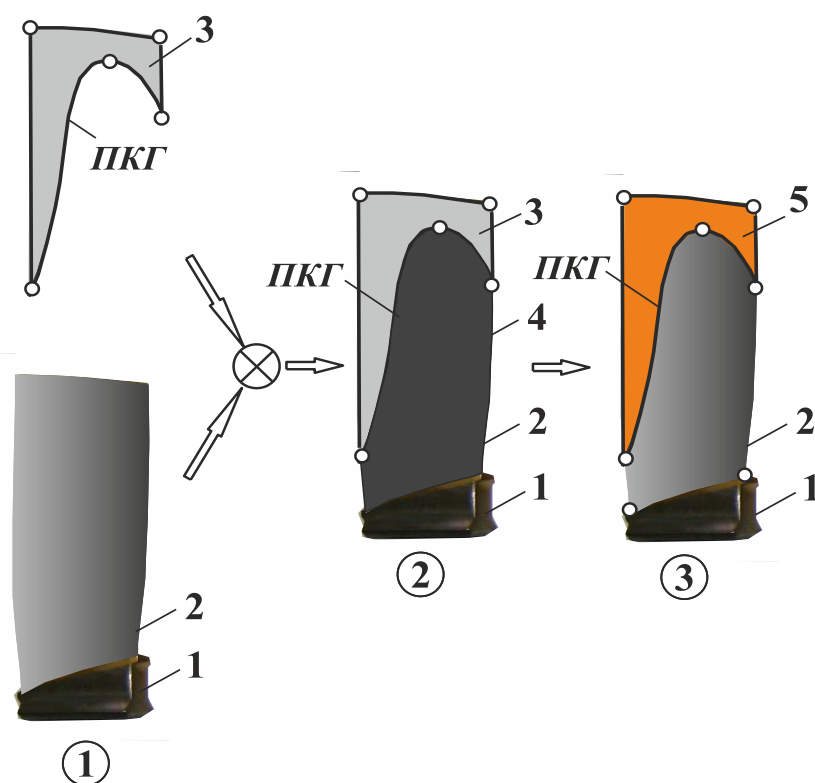


Рисунок 1. Схема формирования одного слоя ФОП с ПКГ

- на первом этапе осуществляется изготовление специального трафарета с необходимым ПКГ его элементов и устанавливается на лопатку компрессора;

- на втором этапе выполняется нанесение сажевой маски на поверхность пера лопатки - свободной от трафарета, при этом сажевая маска с помощью трафарета образуется с заданным ПКГ;

- на третьем этапе производится напыление слоя покрытия на перо лопатки, включая зоны сажевой маски, затем выполняется удаление покрытия, расположенного над сажевой маской, посредством зачищающего полирования, что обеспечивает заданный ПКГ данного слоя покрытия.

Далее, циклы нанесения слоев ФОП повторяются до полного формирования ФОП с n слоями.

Можно отметить, что нитрид титановое покрытие легко удаляется с поверхности пера лопатки в зонах, где имеется сажевая маска - посредством зачищающего полирования (глянцевания). При этом в зонах, где нет сажевой маски, нитрид титановое по-

крытие остается благодаря наличию диффузионных процессов его с основным материалом пера лопатки и частичной реализации имплантационных процессов.

Также следует отметить, что согласно предлагаемому способу, для выполнения сажевой маски на перо лопатки с заданным ПКГ применяются специальные трафареты из тонкой алюминиевой фольги. Это позволяет образовывать сажевую маску на поверхности пера лопатки с заданным ПКГ. Указанный процесс повторяется n раз до нанесения n слоев ФОП.

На рисунке 1 представлена схема формирования одного слоя ФОП с ПКГ. Здесь обозначены следующие позиции: 1 – лопатка компрессора, 2 – перо лопатки, 3 – трафарет из алюминиевой фольги, 4 – сажевая маска, 5 – нитрид титановое покрытие. При реализации данного способа формирования ПКГ каждого слоя нитрид титанового ФОП на перо лопатки компрессора, например из титанового сплава ВТ-8м, трафарет с ПКГ изготавливается из тонкой алюминиевой фольги. При этом для каждого слоя покрытия используется свой конкретный трафарет со своим ПКГ. Сажевая маска на поверхность пера лопатки наносится, например, методом копчения с помощью масляной фитильной горелки. Для каждого слоя нитрид титанового покрытия изготавливается трафарет со своим специальным ПКГ (рисунок 1).

В этом случае, на первом этапе процесса (рисунок 1), для каждого слоя ФОП, осуществляется изготовление специального трафарета 3 с необходимым ПКГ его элементов и выполняется установка его на перо 2 лопатки компрессора 1. На втором этапе, выполняется нанесение сажевой маски 4 на поверхность пера 2 лопатки 1, свободной от трафарета 3. Сажевая маска 4 реализуется посредством масляной фитильной горелки. При этом за счет трафарета 3, сажевая маска 4 образует необходимый ПКГ сажи на поверхности пера 2 лопатки 1. В этом случае, сажевая маска 4 необходима для образования ПКГ слоя покрытия, реализуемого на третьем этапе и предотвращения диффузионных процессов покрытия с основным материалом пера 2 лопатки 1.

Далее, на третьем этапе процесса, производится напыление слоя покрытия 5 на перо 2 лопатки 1, включая зоны сажевой маски 4, затем выполняется удаление покрытия, расположенного над сажевой маской, посредством зачищающего полирования, что обеспечивает реализацию заданного ПКГ данного слоя покрытия 5.

После реализации трех этапов по напылению первого слоя ФОП, выполняется процесс повторения всех этапов для процесса напыления второго слоя ФОП, затем – третьего слоя ФОП, и так далее, пока не будут реализованы все слои ФОП лопатки компрессора (рисунок 1). Для каждого слоя покрытия 5 пера 2 лопатки 1 трафарет 3 имеет свой ПКГ элементов.

Можно отметить, что для каждой лопатки группы количество слоев ФОП и их толщина определяются гарантированным ресурсом ГТД и интенсивностью износа лопатки в каждой ступени и группе лопаток.

3. Алгоритм реализации технологического процесса формирования многослойного ФОП с ПКГ каждого слоя.

На рисунке 2 представлен алгоритм реализации технологического процесса формирования ФОП с ПКГ каждого слоя. Можно отметить, что этот алгоритм реализуется в следующей последовательности:

1. Задаются исходные данные технологического процесса реализации ФОП лопатки компрессора.
2. Задается параметр $i = 1$, который обозначает первый слой ФОП.

3. Выполняется первый этап технологического процесса.
4. Реализуется второй этап технологического процесса.
5. Выполняется третий этап технологического процесса.
6. Назначается значение слоя покрытия $i = i + 1$, то есть добавляется следующий слой покрытия.
7. Выполняется проверка, а именно если $i < n$ идет возврат к процедуре первого этапа технологического процесса.
8. Если $i = n$, данный процесс завершается, так как все слои ФОП сформированы и переходит к этапу *END*.

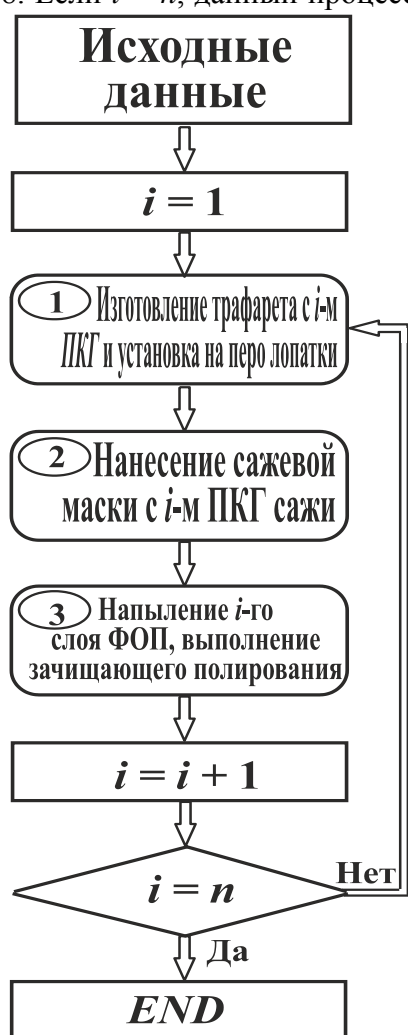


Рисунок 2. Алгоритм реализации технологического процесса формирования ФОП с ПКГ каждого слоя

По предлагаемому способу [7] экспериментально установлено, что только сажевая маска не выгорает при температурах нанесения нитрид титанового покрытия на лопатки компрессора. При этом через сажу не проходят потоки ионов нитрид титана до основного материала пера лопатки, что позволяет высокопроизводительными методами выполнять ПКГ каждого слоя ФОП.

А также реализация данного способа позволяет с помощью сажевых масок обеспечивать сложный ПКГ покрытия лопаток компрессора с помощью трафаретов, даже в единичном и мелкосерийном производстве ФОП. Таким образом, предлагаемый способ позволяет повысить производительность напыления нитрид титанового ФОП на лопатки компрессора и расширить технологические возможности этого процесса.

В заключении можно отметить, что разработанный способ [7] реализации ПКГ каждого слоя для ФОП позволяет обеспечивать сложный пространственный контур каждого слоя покрытия, состоящего из n покрытий. А также этот способ расширяет технологические возможности реализации ФОП лопаток компрессора и является вторым способом формирования этого покрытия.

4. Методика определения геометрических параметров ПКГ многослойного ФОП лопаток

Для реализации предлагаемых способов формирования ФОП лопаток компрессора [7, 8] на первом этапе, при определении ПКГ, который изменяется в процессе эксплуатации лопаток с покрытием, необходимо определять геометрические параметры ПКГ для реализации специальных экранов [7] или трафаретов [8] с заданными параметрами ПКГ.

Можно отметить, что в процессе износа покрытия лопатки компрессора происходит износ покрытия равной толщины, при этом ПКГ покрытия со временем изменяется. Для определения особенностей изменения ПКГ в процессе абразивно-эрозионного износа лопатки при эксплуатации компрессора ГТД, выполняется, через равные промежутки времени, фотографирование особенностей износа лопатки компрессора с покрытием.

На рисунке 3 в качестве примера представлены лопатки компрессора со схемами ПКГ износа покрытия. Здесь показано: рисунок 3, а – общий вид рабочей лопатки с тремя ПКГ; рисунок 3, б – схема рабочей лопатки с пятью ПКГ; рисунок 3, в – общий вид лопатки направляющего аппарата (НА) статора с ПКГ.

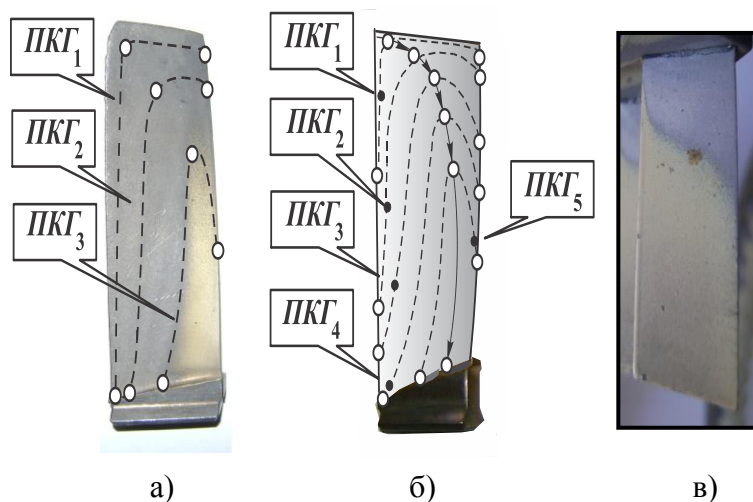


Рисунок 3. Лопатки компрессора со схемами ПКГ износа покрытия: а – общий вид рабочей лопатки с тремя ПКГ (5-я группа лопаток); б – схема рабочей лопатки с пятью ПКГ (5-я группа лопаток); в – общий вид лопатки НА статора с ПКГ (3-я группа лопаток)

Значение величины равных промежутков времени определяется на основании следующего выражения:

$$T_i = \frac{T_o}{n}, \quad (1)$$

где T_i – значение величины равного промежутка времени наблюдения за износом покрытия лопатки компрессора; T_o – гарантированный ресурс лопаток компрессора; n – количество слоев ФОП.

Далее, в программе CorelDraw строится усредненная кривая линия ПКГ износа и определяются ее координаты. На рисунке 3 приведены

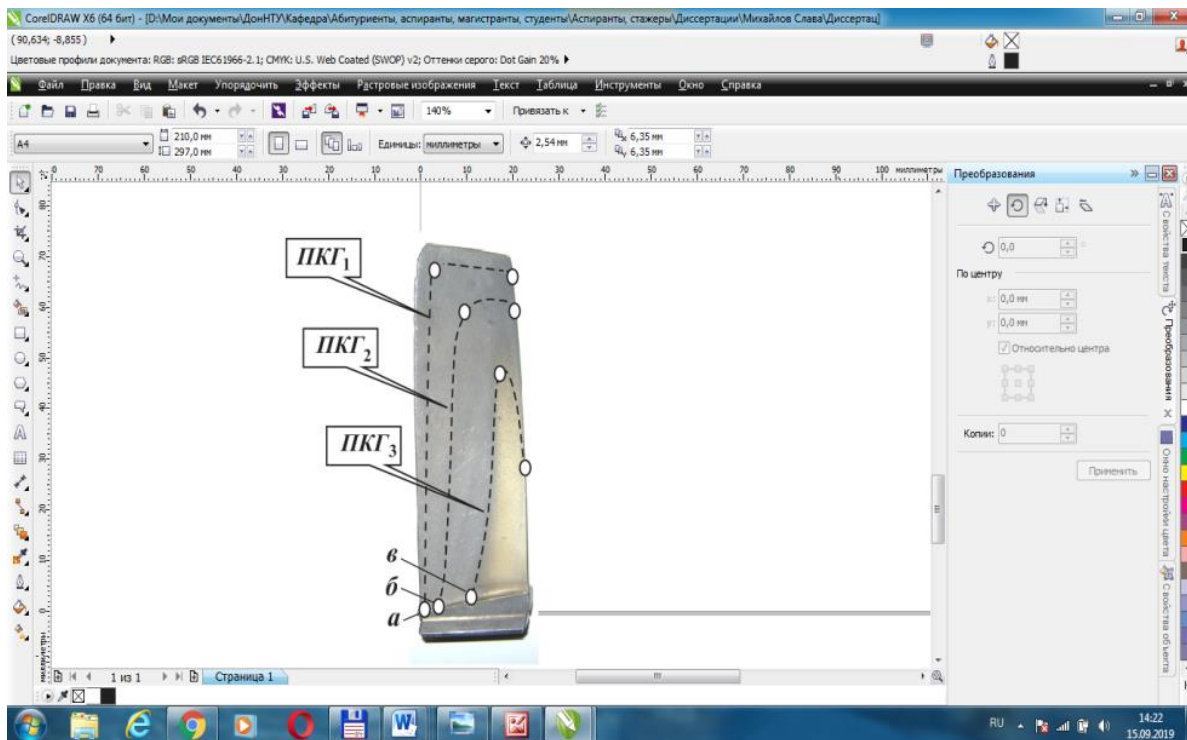


Рисунок 4. Общий вид рабочей лопатки компрессора с ПКГ износа покрытия в окне программы CorelDraw Graphics Suite X6 в процессе определения его координат

примеры наложения ПКГ по износу покрытия на поверхности пера лопатки.

Для решения этих задач в данной работе разработана методика определения геометрических параметров ПКГ покрытия групп лопаток компрессора. Эта методика включает выполнение следующих этапов исследований:

1. Через равные промежутки времени, определяемыми по выражению (1), выполняется фотографирование особенностей износа опытного покрытия лопаток компрессора.

2. Выполняется установка полученной фотографии с особенностями износа опытного покрытия лопатки компрессора - на экран монитора в программе CorelDraw Graphics Suite X6. Реальные размеры лопатки на фотографии приводятся в соответствие со значениями линейки окна монитора.

3. По характеру износа покрытия на пера лопатки в программе CorelDraw Graphics Suite X6 строится усредненная кривая линии ПКГ (рисунок 4).

4. Фотография лопатки с кривой первого $ПКГ_1$ передвигается на экране монитора таким образом, что она точкой a устанавливается на листе монитора в начало системы координат, имеющими параметры $x = 0, y = 0$.

5. Крестик курсора последовательно ориентируется по точкам кривой линии $ПКГ_1$ через равные участки по оси x , и в верхнем левом углу экрана определяется значение координаты y (рисунок 4). Полученные данные значений координат ПКГ записываются в таблицы.

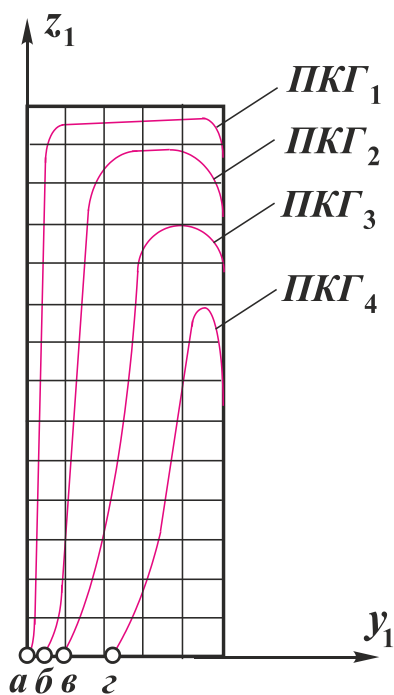


Рисунок 5. ПКГ абразивно-эрозионного износа однослойного покрытия пера рабочей лопатки компрессора ГТД

6. Далее, продолжается эксплуатация ГТД, и через период, определяемый по формуле (1), производится фотографирование пера лопатки с изношенным покрытием. При этом все позиции данной методики повторяются и определяются координаты $ПКГ_2$, затем – $ПКГ_3$, и так далее до определения всех $ПКГ_n$.

На основании полученных данных координат ПКГ обеспечивает возможность реализации следующего:

1. Изготовления комплекта защитных экранов с ПКГ для реализации разработанного способа формирования многослойных ФОП [7] пера лопатки компрессора.

2. Изготовление трафаретов для реализации сажевых масок и формирования ФОП [8] пера лопатки компрессора.

На рисунке 5 показаны пространственные контуры границ (ПКГ) абразивно-эрозионного износа пера рабочей лопатки компрессора ГТД модели ТВ3-117 рабочей лопатки 1-ой ступени. Здесь, схематично показаны 4-е замера ПКГ через равные промежутки времени. Значение времени замеров определялись на основании выражения (1). Для данных лопаток $T_i = 1500$ час. При этом количество измерений и число слоев ФОП составляет $n = 4$.

В процессе измерения координат ПКГ, сначала выполняется измерение параметров $ПКГ_1$ первого контура (рисунок 5) лопатки компрессора, затем – $ПКГ_2$ второго контура, и так далее, пока все контуры не будут скоор-

динированы в соответствии с предлагаемой методикой. Результаты измерений координат ПКГ износа пера лопатки компрессора заносятся в таблицы.

В таблице 1 представлены геометрические параметры 1-го ПКГ рабочей лопатки компрессора первой ступени для пяти ФОП в системе координат y_1, O, z_1 . Эти параметры определялись по лопаткам компрессора ГТД серии ТВ3-117, представленных ОАО «Луганский авиаремонтный завод».

Таблица 1. Геометрические параметры 1-го ПКГ рабочей лопатки компрессора первой ступени для пяти слоев ФОП в системе координат y_1, O, z_1

Номер группы лопаток	Номер ступени лопаток	Номер ПКГ	Номер точки ПКГ	y_1	z_1	Номер точки ПКГ	y_1	z_1
5	1	1	1	0	0	16	63,0	2,334
			2	0,5	0,349	17	65,0	2,532
			3	1,0	0,482	18	66,0	2,995
			4	1,5	0,614	19	67,0	3,591
			5	2,0	0,680	20	67,5	4,054
			6	2,5	0,813	21	67,545	4,913
			7	3,0	0,879	22	67,611	8,0
			8	3,5	0,945	23	67,809	11,0
			9	4,0	1,010	24	67,876	14,0
			10	5,0	1,011	25	68,206	20,0
			11	10,0	1,077	26	68,272	22,839
			12	20,0	1,342	27	68,0	23,765
			13	40,0	1,805	28	67,0	24,559
			14	50,0	1,937	29	66,0	24,956
			15	60,0	2,201	30	64,0	25,0

После определения координат 1-го ПКГ₁ износа покрытия пера лопатки выполняется процесс определения координат 2-го ПКГ₂. Результаты замеров заносятся в таблицу 2.

Можно отметить, что процесс определения геометрических параметров 2-го ПКГ₂ износа покрытия пера лопатки, а также последующих ПКГ, выполняется аналогично измерениям для 1-го ПКГ₁. В этом случае, производится фотографирование особенностей износа опытного покрытия ПКГ пера лопатки (рисунок 5), выполняется установка полученной фотографии на экран монитора в программе CorelDraw Graphics Suite X6, производится необходимое ориентирование фотографии в соответствии с разработанной методикой и затем, производится определение параметров ПКГ.

В таблице 2 представлены геометрические параметры 2-го ПКГ рабочей лопатки компрессора 1-ой ступени для пяти слоев ФОП в системе координат y_1, O, z_1 .

Таблица 2. Геометрические параметры 2-го ПКГ рабочей лопатки компрессора первой ступени для пяти слоев ФОП в системе координат y_1, O, z_1

Номер группы лопаток	Номер ступени лопаток	Номер ПКГ	Номер точки ПКГ	y_1	z_1	Номер точки ПКГ	y_1	z_1
5	1	2	1	0	2,069	10	7,824	56,565
			2	1,002	2,598	11	8,816	60,0
			3	1,928	3,0	12	10,536	62,5
			4	3,855	4,508	13	13,643	64,105
			5	4,252	6,955	14	18,345	64,370
			6	4,583	10,0	15	21,119	63,642
			7	5,310	20,0	16	23,368	61,856
			8	6,832	40,0	17	24,559	59,872
			9	7,361	50,0	18	25,0	56,829

Далее, после определения координат 2-го $ПКГ_2$ износа покрытия пера лопатки выполняется процесс определения координат 3-го $ПКГ_3$. Результаты замеров заносятся в таблицу 3.

В таблице 3 представлены геометрические параметры 3-го ПКГ рабочей лопатки компрессора 1-ой ступени для пяти слоев ФОП в системе координат y_1, O, z_1 .

Аналогично определяются параметры координат 4-го $ПКГ_4$ износа покрытия пера лопатки. Результаты замеров заносятся в таблицу 4.

В таблице 4 представлены геометрические параметры 4-го ПКГ рабочей лопатки компрессора 1-ой ступени для пяти слоев ФОП в системе координат y_1, O, z_1 .

Для 5-го слоя ФОП ПКГ не определяется, так как он реализуется без экрана.

Таблица 3. Геометрические параметры 3-го ПКГ рабочей лопатки компрессора первой ступени для пяти слоев ФОП в системе координат y_1, O, z_1

Номер группы лопаток	Номер ступени лопаток	Номер ПКГ	Номер точки ПКГ	y_1	z_1	Номер точки ПКГ	y_1	z_1
5	1	3	1	4,434	0	7	14,025	45,0
			2	6,815	5,0	8	14,356	49,0
			3	9,858	15,0	9	17,877	53,0
			4	11,710	25,0	10	20,0	54,663
			5	13,165	35,0	11	23,484	53,340
			6	13,636	40,0	12	25,0	49,768

Таблица 4. Геометрические параметры 4-го ПКГ рабочей лопатки компрессора первой ступени для пяти ФОП в системе координат y_1, O, z_1

Номер группы лопаток	Номер ступени лопаток	Номер ПКГ	Номер точки ПКГ	y_1	z_1	Номер точки ПКГ	y_1	z_1
5	1	4	1	11,049	0	7	21,566	43,088
			2	13,929	13,0	8	22,293	44,014
			3	17,002	15,0	9	22,889	44,146
			4	18,788	25,0	10	24,079	42,889
			5	20,177	35,0	11	24,939	39,846
			6	21,301	42,029	12	25,0	36,605

Таким образом, предлагаемая методика позволяет формировать координаты ПКГ для технологического обеспечения синтеза многослойного ФОП лопаток ГТД на базе специальных экранов или трафаретов, предлагаемых в работах [7, 8].

5. Заключение

В заключении можно отметить, что выполненные исследования направлены на создание технологического обеспечения для формирования геометрических параметров слоев многослойного ФОП лопаток ГТД. Эти исследования проведены на основе анализа особенностей износа покрытия, возникающего при эксплуатации лопатки, разработки методики и алгоритма реализации ПКГ слоев многослойного покрытия. Они позволили разработать ряд специальных способов формирования ФОП на уровне изобретений.

Проведенные исследования позволяют формировать многослойное ФОП лопаток ГТД в зависимости от действующих эксплуатационных функций (например, абразивно-эрозионного износа) и необходимых параметров ПКГ каждого слоя. На основании выполненных исследований в данной работе решено следующее:

- выполнен анализ особенностей формирования ПКГ износа однослойного опытного покрытия лопатки и особенностей формирования ПКГ слоев многослойного ФОП;
- разработан алгоритм реализации технологического процесса формирования многослойного ФОП с ПКГ каждого слоя;
- предложена методика определения геометрических параметров ПКГ многослойного ФОП лопаток.

ФОП лопаток адаптирует их работу к особенностям действия неравномерного износа лопатки и их групп в ГТД, что значительно повышает ресурс авиационного двигателя [5, 6].

ЛИТЕРАТУРА:

1. 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.
2. Авиинформ // Ежемесячный информационно-аналитический журнал. – М.: Международная ассоциация «Союз авиационного двигателестроения», 2020. – Вып. № 2 (191). – 140 с.
3. Михайлов, Д. А. Основные особенности эксплуатации лопаток компрессора ГТД и классификация их эксплуатационных функций / Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научных трудов. – Донецк: ДонНТУ, 2015. – Вып. 4 (50). – С. 126–131.
4. Михайлов, В. А. Совершенствование структурного и технологического обеспечения изготовления лопаток компрессора вертолетных газотурбинных двигателей на основе связанных технологий: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08 / В. А. Михайлов. – Донецк: ДонНТУ, 2019. – 18 с.
5. 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>.
6. 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.
7. Патент № 54100 Украина, А МПК 7 С23С 14/04. Спосіб нанесення нітридного декоративного рельєфного покриття на поверхню виробу / В. О. Михайлов. – № 2002053915; заявл 14.05.2002, БИ 3003. – 6 с.
8. Патент № 2718877 RU. С23С 14/04. Способ нанесения функционально-ориентированного износостойкого покрытия на лопатку газотурбинного двигателя / А. Н. Михайлов, Д. А. Михайлов, В. А. Михайлов и [др.]. – № 2018107164; заявл. 26.02.2018; Бюл. № 11, 15.04.2020. – 7 с.

Поступила в редколлегию 22.04.2020 г.

УДК 621.9.025

Ю. П. Ракунов, к.т.н., доц., **В. В. Абрамов**, д.т.н., проф., **А. Ю. Ракунов**, инженер
НИУ Московский государственный строительный университет, Россия
Телефон: +7 (916) 8107126; E-mail: Rakunov1991@mail.ru

ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ ПРИНЦИПЫ РАЗРАБОТКИ И РЕАЛИЗАЦИИ СИСТЕМЫ МНОГОУРОВНЕВОЙ БАЗОВОЙ ГРУППОВОЙ ТЕХНОЛОГИИ

В статье рассматриваются научные основы и методология разработки и внедрения системы многоуровневой базовой технологии, использующей нисходящее и восходящее проектирование групповых технологических процессов (ТП) методом «анализа-синтеза» конструкторско-технологической информации. Разработана структура документов базовой технологии в виде таблиц-матриц, которая позволяет формализовать анализ и синтез различных базовых уровней ТП: автоматический выбор позиционных наладок инструмента, условий выполнения (оптимальных режимов резания) проходов, переходов, позиции и установов (детале-операций). Метод синтеза может быть эффективно использован как для индивидуальной оптимизации обработки крупносерийных деталей, так и для групповой обработки деталей любой сложности в современном серийном и мелкосерийном многономенклатурном производстве.

Ключевые слова: автоматизация проектирования технологических процессов, метод «анализа-синтеза», многоуровневая базовая технология, первичная подсистема, типаж унифицированного режущего инструмента, оптимальные условия резания, критерии оптимизации.

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

BASIC SCIENTIFIC PRINCIPLES OF DEVELOPMENT AND IMPLEMENTATION OF THE SYSTEM OF MULTI-LEVEL BASIC GROUP TECHNOLOGY

The article discusses the scientific foundations and methodology of the development and implementation of a multi-level basic technology system, using top-down and bottom-up design of technological processes (TP) by the method of "analysis-synthesis" of design and technological information. The structure of documents of the basic technology in the form of matrix tables has been developed, which allows you to formalize the analysis and synthesis of various basic TP levels: automated selection of positional tool settings, implementation conditions (optimal cutting modes) passes, transitions, positions and settings (detail-operations). The synthesis method can be effectively used both for individual optimization of processing large-scale parts, and for batch processing of parts of any complexity in modern serial and small-scale multi-item production.

Keywords: automation of the design of technological processes, the method of "analysis-synthesis", multi-level basic technology, the primary subsystem, the type of unified cutting tool, optimal cutting conditions, optimization criteria.

1. Введение

Система автоматизации проектирования технологических процессов (САПР ТП) включает методику выбора схем базирования и установочных приспособлений, типоразмеров инструмента и синтеза инструментальных наладок, в том числе, групповых, назначения, выбора или расчёта режимов обработки при разработке надёжных ресурсосберегающих процессов, обеспечивающих требуемое качество деталей машин и приборов. В современной специальной литературе [1-4,8] излагаются методические основы автоматизированного проектирования ТП в машиностроении, где основное внимание уделено процессам механической обработки заготовок на станках с ЧПУ. Представлены типовая структура САПР ТП и фрагменты автоматизации проектирования технологических детали-операций и переходов на отдельных этапах ТП [1, 3, 4].

Однако существующим САПР ТП присущи **принципиальные недостатки**:
– смешение уровней информации, находящейся на различных уровнях технологии;
– принятие решений при недостатке информации или её избытке;
– отсутствие типажей инструментов, специально спроектированных для осуществления индивидуальной и особенно, групповой обработки;
– отсутствие конкретных технологических рекомендаций по назначению или выбору режимов оптимального резания (РОР), а также данных по качеству обработки и стойкости инструментов при минимально необходимом количестве проходов (рабочих ходов).

Эти недостатки не дают возможности разрабатывать оптимальные групповые ТП, групповые инструментальные наладки для конкретных установов (деталеопераций), например, токарной или фрезерной обработки деталей или групп деталей (заготовок).

За последние 10–15 лет состояние автоматизации синтеза структур ТП изменилось мало. Проблема автоматизированного синтеза единичных, типовых и групповых ТП остаётся важнейшей и наиболее актуальной задачей САПР ТП в машиностроении [1, 3, 4, 8].

Целью создания системы многоуровневой базовой групповой технологии (МБГТ) является развитие технологии как точной науки путём выявления закономерностей и установления взаимосвязей по указанным направлениям и предметам исследования [5-7].

2. Основное содержание и результаты работы

В исследованиях, представленных в работах [1, 3, 4, 10] и др., достаточно убедительно показано, что сложность автоматизации проектирования (синтеза) структур ТП объясняется большим объемом правил проектирования, **слабой их формализацией**, динамичностью схем их применения, определяемых конкретными производственными условиями. Современные системы проектирования характеризуются применением эвристических алгоритмов формирования структур, строго ориентированных на ограниченное число производственных ситуаций, поэтому системы плохо тиражируемы и не адаптивны. Для корректировки решений, облегчения процесса кодирования и ввода исходных данных об изделии применяют диалог пользователя с системой. Однако, даже диалог не позволяет повысить эффективность проектирования структуры ТП, если алгоритмы не были рассчитаны на конкретную производственную ситуацию. Оперативно изменить или дополнить алгоритмическое и программное обеспечение не представляется возможным.

Создание САПР ТП на основе конструктивно-технологических параметров предмета производства (в частности – детали) является одной из наиболее актуальных и нерешенных пока проблем автоматизации проектирования. **Главной причиной этого является отсутствие общего решения проблемы синтеза структур объектов проектирования, инвариантного их классу** [1, 3-6].

Объектом исследования является технологическая (физическая) модель изделия (детали) на основе единой системы признаков, описывающих типоразмеры деталей (заготовок), технологические методы и средства, обеспечивающие номенклатуру, диапазоны и точность формируемых свойств типоразмеров обрабатываемых поверхностей.

Единая система технологических признаков (свойств), учитывающих номенклатуру, диапазон и точность этих свойств, позволяет обеспечить сопоставление, подбор типоразмеров индивидуальных и групповых инструментальных наладок (ГИН), РОР

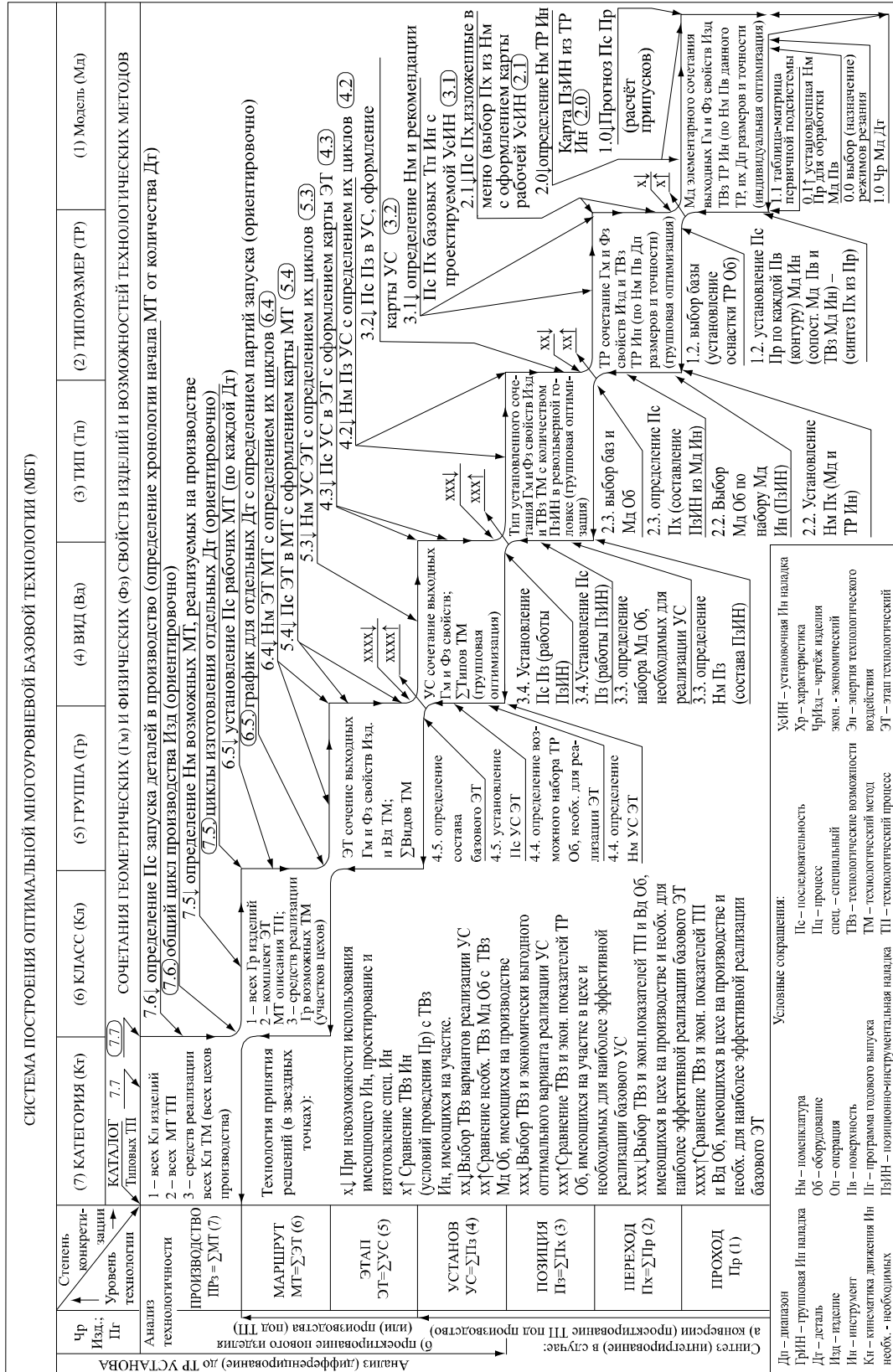


Рисунок 1. Уровни базовой групповой технологии и степени конкретизации информации

для каждого типоразмера (модели) инструмента и необходимую эффективность групповых ТП с применением современной компьютерной техники (рис. 1).

Согласно предложенному информационному методу «анализа-синтеза», или системному объектно-структурному подходу, проектирование ТП следует начинать с наименее информативно ёмких задач [2, 5, 6]. При решении задач следующего (нижнего) уровня используют строго дозированную информацию (принадлежащую только к этому уровню) и информацию более высокого уровня, необходимую и достаточную для решения задачи на этом уровне, например, типоразмера, т. е. перехода в структуре ТП. В этом процессе (итерации) смешение уровней информации недопустимо (см. рис. 1) [2-6].

«Смешение уровней информации является проклятием больших систем» – считал отец кибернетики Н. Винер, а «благополучие нации (обрабатывающих и оборонных отраслей промышленности) висит на кончике резца» – сказал другой классик [5].

Разработку вариантов ТП ведут в двух противоположных направлениях (нисходящее – восходящее проектирование): маршруты дифференцируют до уровня базовых установов (типоразмеров детали-операций), а затем техническое содержание конкретного исполнения (моделей) установов синтезируют из технологических элементов нижних уровней: позиций, переходов и рабочих ходов (проходов) [10-13].

Процесс варьирования параметров (параметрической настройки) значительно более формализован и менее зависим от производственной ситуации, поэтому в последнее время появилось много систем, в которых автоматически (или автоматизировано) выполняется параметрическая настройка, а структура ТП формируется вручную, и информация о ней вводится в систему как исходные данные [1, 3, 4]. Такие системы легко адаптируются к производственным условиям, требуют введения относительно небольшого объёма исходных данных и легко воспринимаются специалистами при их внедрении. Однако, эффективность решений в таких системах определяется квалификацией инженера-технолога, – отсутствует возможность оптимизировать структуру объекта проектирования.

В наиболее часто встречающихся оценках состояния автоматизированного синтеза ТП указывается, что при его реализации маршрутная и операционная технологии должны создаваться на основе общих закономерностей проектирования или эвристик, справедливых для ограниченного класса деталей и определённых типов производств [1, 3].

Утверждается, что сформировать закономерности проектирования и критерии ТП, с помощью которых можно было бы разрабатывать весь процесс изготовления деталей, на сегодняшний день не представляется возможным [1, 3, 4]. Теория синтеза структур ТП, несмотря на усилия исследователей, разработана недостаточно.

Структура САПР ТП и состав её подсистем (прежде всего, проектирующих) определяются реализуемой в ней **методологией проектирования** [3-5,10]. Существуют две основные методологии проектирования ТП изготовления изделий машиностроения:

- проектирование типовых ТП на базе использования ТП-аналогов;
- синтез единичных ТП на основе конструктивно-технологических характеристик изготавливаемых изделий.

Процессами-аналогами называют типовые и групповые ТП. Единичный ТП также можно спроектировать на основе процессов-аналогов. В этом случае его структура и

содержание технологических детали-операций в значительной мере определяются структурой процесса-аналога [1, 3, 4].

При использовании метода синтеза ключевым вопросом построения САПР ТП является вопрос о том, как в данной системе осуществляется синтез структуры объектов проектирования: – рабочих ходов (проходов), переходов, позиций, установов (групповых детали-операций) и технологических этапов в маршруте [10-13].

Существуют **принципиально различные подходы к построению САПР ТП**. Известны несколько классификаций методов проектирования ТП, положенных в основу создания соответствующих систем [1, 3, 4, 10].

При разработке технологии производства новых видов изделий при отсутствии типовых ТП, эффективным методом оптимального решения задачи является **метод синтеза**, то есть интегрирования по определённым правилам более высоких уровней ТП из их составляющих: переходов из проходов (рабочих ходов), установов и позиций из переходов, этапов из установов, маршрутов из этапов [6, 10-13].

Для реализации этого подхода разработана структура документов МБТ в виде таблиц-матриц, что позволяет **формализовать процесс синтеза** различных уровней ТП: автоматизированного выбора позиционных инструментальных наладок (ПЗИН), условий осуществления проходов, переходов, позиций и установов (детале-операций).

Рабочие таблицы-матрицы первичной подсистемы по горизонтали начинаются с характеристик технологических видов поверхностей: их геометрической формы, взаимного положения и сопряжения. Путём добавления соотношений параметров поверхностей и технологических признаков метода обработки получаем характеристику типов, определяющих номенклатуру поверхностей, формирование которых возможно данным методом. Дальнейшее дополнение таблиц-матриц информацией о диапазонах всех геометрических параметров и физических свойств, а также точности их выполнения на уровне отдельных проходов и их совокупности, т.е. **переходов**, даёт полную характеристику типоразмеров поверхностей детали [12].

Первичная подсистема МБГТ предусматривает по входным данным о виде и типе поверхностей вращения, их взаимном положении и сопряжении, размерах и требуемых качественных свойствах получение следующей выходной информации:

- тип и типоразмер (ТР) унифицированного режущего инструмента (УРИ) [7, 9, 13];
- материал и геометрия активной части УРИ [7, 9, 11];
- модель УРИ и параметры ПЗИН для выбранного ТР станка (рис. 2);
- режимы оптимального резания: глубина, подача, скорость резания, СОЖ [14-17];
- необходимое исходное состояние поверхности по каждому проходу [12];
- номенклатура и последовательность проходов, т. е. состав перехода [7];
- прогнозируемый ресурс ПЗИН, инструментоёмкость, станкоёмкость, трудоёмкость и другие технико-экономические показатели каждого перехода [13].

Алгоритм синтеза технологических переходов по таблицам-матрицам:

1. Определение номенклатуры проходов по каждой поверхности в их обратной последовательности, т. е. от конечного (финишного) прохода до начального. Таким образом устанавливается полная номенклатура проходов при выполнении перехода в ТР установа, на эскизе, которого указаны все обрабатываемые при этом поверхности.

2. Установление хронологически неразрывной последовательности проходов по поверхностям контуров обработки, которые обходит каждая модель УРИ конкретного

исполнения; при этом состав (номенклатура и последовательность) проходов образует технологический переход [12].

Проход – "одноразовое неразрывное (технологически и хронологически) взаимодействие зоны формирования свойств ($n \geq 1$ точек или линий) с определенными условиями обеспечения сочетаний элементарных свойств (физических и геометрических) единичной поверхности" – является первичным уровнем в структуре ТП.

Переход – номенклатура и последовательность (состав) проходов, выполняемых одной моделью ПЗИН при неизменной позиции (степенях свободы) заготовки относительно векторов инструмента в координатах оборудования.

Оптимизация синтеза ГИН для универсальных токарных станков и станков с ЧПУ позволяет минимизировать количество ТР УРИ в групповом производстве, добиваясь увеличения общего количества высокоточных деталей, обрабатываемых до смены РИ после достижения максимально допустимого износа каждого из них [11-13].

Работа по синтезу (интегрированию) модели установка начинается с первичной подсистемы МБТ, разработанной в таблично-матричной форме и определяющей комплекс условий технологической наследственности на каждом проходе для обеспечения параметров формируемых свойств обрабатываемых поверхностей [5-7]. Это позволяет сопоставлять технологическую модель детали с моделью технологических методов, формирующих свойства на всех этапах ТП, подбирать оптимальный метод и минимизировать количество ТР УРИ, станкоёмкость и технологическую себестоимость.

Метод синтеза хотя бы один раз требует формирования внешних связей между элементами для создания из них элементов более высокого уровня. Этот метод предполагает определение состава элементов, построение новых связей, проверку их достоверности и параметрическую настройку с использованием логических правил и аналитических зависимостей. При использовании аналогов необходимо включать в аналог новые элементы или существенно изменять их последовательность [1, 3, 8, 19].

Подсистема синтеза конкретизирует содержание и дополняет номенклатуру установов последовательным синтезированием номенклатуры и последовательности (состава) входящих технологических событий уровней позиций и переходов из первичных элементов ТП, с учетом конкретных моделей оборудования и возможностей групповых и индивидуальных (специальных), позиционных и детали-операционных (установочных) ИН, а также управляющих программных наладок [10-13].

Типаж унифицированных универсальных резцов (УУР) для групповой и индивидуальной оптимизации обработки на станках с ЧПУ показан на рис. 2.

Заполнение таблицы-матрицы интегрирования до уровня установов для конкретной модели (налаженного) оборудования производится в определённой последовательности:

1. Разбивка всей номенклатуры переходов (по таблице-матрице [12]) с учётом точности взаиморасположения (несоосность, непараллельность, неперпендикулярность) обрабатываемых поверхностей на уровне подсовокупности (типоразмеров) переходов, осуществляемых при обработке заготовки с одной стороны, т.е. на совокупность переходов составляющих номенклатуру позиций токарных установов. При наличии контршпинделя обе позиции выполняются в одном установе (групповой детали-операции).

2. Выбор установочной базы – схемы базирования и ТР установочной оснастки, базовой поверхности на заготовке, исходя из взаиморасположения совокупностей ТР поверхностей – контуров обработки. Формирование групповой установочной наладки.

ОБР. ПОВЕРХН. ТИП РЕЗЦА	ТИПОРАЗМЕР	Размеры обраб. поверх.			Констр. размеры	Геом. в плане	ОБР. ПОВЕРХН. ТИП РЕЗЦА	ТИПОРАЗМЕР	Размеры обраб. поверх.			Констр. размеры	Геом. в плане
		$\frac{D}{d}$	$\frac{T}{t}$	$\frac{L}{l}$					$\frac{D}{d}$	$\frac{T}{t}$	$\frac{L}{l}$		
02ЦФ	10ЦФ	от 2	3	5/03	16	1,5 5,0 7 3	10ЦФ	10ЦФ	от 2,5	16	105	4,5 7,0 9,5	100 15
		до 3	5/05	92 5 2 5,25	18	1,5 5,0 7 3			16 105 25 20	8,0 10 15			
03ЦФ	18ЦФ	от 3	3	5/05	16	2,0 5,0 6,0 10 3	18ЦФ	18ЦФ	от 2,5	16	105	7,5 9,0 15	100 15
		до 4	5/07	94 7 2 6,0	18	2,5 5,0 6,0 10 3			16 105 36 15	8,0 9,0 15			
04ЦФ	20ЦФ	от 4	3	5/10	16	3,0 5,0 7,0 13 7	20ЦФ	20ЦФ	от 1	17	78	8,0 10 12	100 15
		до 6	5/15	98 9 4,3 6,5	20	1,5 5,0 7,0 13 7			16 70 10 12	8,0 9,0 10,3			
06ЦФ	007Ц	от 3	1,5	16	3,0 6,0 7,0 13 13	007Ц	007Ц	от 0	200	160	8,0 10	95 15 98 12 12 98 15 95	
		до 6	2,5	16	5,0 8,0 8,0 12 12			200	160	8,0 10			

1. ГАММА РЕЗЦОВ ПОЗВОЛЯЕТ ОБРАБАТЫВАТЬ 80-90% ДЕТАЛЕЙ, ПЕДНАЗНАЧЕННЫХ ДЛЯ ОБРАБОТКИ НА СТАНКАХ С ПУ.
2. СТОИМОСТЬ РЕЗЦОВ В 2-3 РАЗА ВЫШЕ НОРМАЛИЗОВАННЫХ ИЛИ СПЕЦИАЛЬНЫХ ПАЯНЫХ РЕЗЦОВ.
3. КОЭФФИЦИЕНТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТВЕРДОГО СПЛАВА ПОВЫШАЕТСЯ В 10 РАЗ ДЛЯ РАСТОЧНЫХ И В 3 РАЗА ДЛЯ НАРУЖНЫХ РЕЗЦОВ.
4. ТРУДОЕМКОСТЬ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ РЕЗУЩИХ ВСТАВОК ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ МНОГОМЕСТНЫХ КАССЕТНЫХ ПРИСПОСОБЛЕНИЙ УМЕНЬШАЕТСЯ В 2 РАЗА

Рисунок 2. Типаж унифицированных универсальных резцов для групповой обработки деталей на автоматизированном оборудовании и прецизионных токарных станках с ЧПУ.

3. Выбор типоразмера базовой модели (или нескольких рабочих моделей) оборудования из технически удовлетворяющих требованиям по диапазону и точности, количеству и схеме рабочей зоны инструмента, организационным соображениям (наличие выбранных станков на участке, в цехе, с учётом загруженности станков) по типуажу с технологическими параметрами и возможностями оборудования.

4. Выбор номенклатуры УРИ в ГИН для каждого станка (детале-операции). Учитывается необходимое количество ПЗИН, исходя из напряженности переходов и ресурса каждой ПЗИН с учетом возможности их дублирования для повышения стойкости наиболее напряженной, т. е. менее ресурсостойкой. Как правило, это УРИ для обработки наружных цилиндрических поверхностей (бывают внутренние или торцевые – у деталей с преобладающими площадями обрабатываемых торцов) (**блок-схема 1**) [7, 11-13, 15-17].

5. Выбор конкретной (рабочей) модели оборудования из возможных (см. п. 3) по номенклатуре установочных ГИН. Отбор оптимальной модели производится по количеству устанавливаемых УРИ, обеспечиваемой точности обработки и экономическим показателям.

6. Уточнение (синтезирование) рабочей модели (налаженного) оборудования, с установлением конкретных групповых инструментальных наладок [12, 13].

7. Оформление детали-операционной карты группового станка, установочной инструментальной оснастки, с оснащением контрольно-измерительной аппаратурой.

8. Уточнение количества станков (детале-операций) в технологическом этапе.

Оптимизация модели группового или индивидуального станка проводится по критерию максимальной производительности при гарантированном обеспечении необходимых показателей качества деталей. Характер оптимизации зависит от типоразмера производства и, как следствие этого, организационно-технологических условий обработки:

- групповая оптимизация осуществляется для случая разработки технологических процессов в условиях многономенклатурного мелкосерийного производства, когда обработка конкретной детали не загружает станок в течение рабочей смены (определяется критической партией запуска методом «прямого счёта») [11, 12];

- индивидуальная оптимизация осуществляется в случае разработки ТП на деталь, обеспечивающую загрузку оборудования в течение одной или более рабочих смен. Инструмент при этом оптимизируется под изготовление этой массовой детали, включая, при необходимости, изготовление или синтезирование спецрезцов повышенной стойкости;

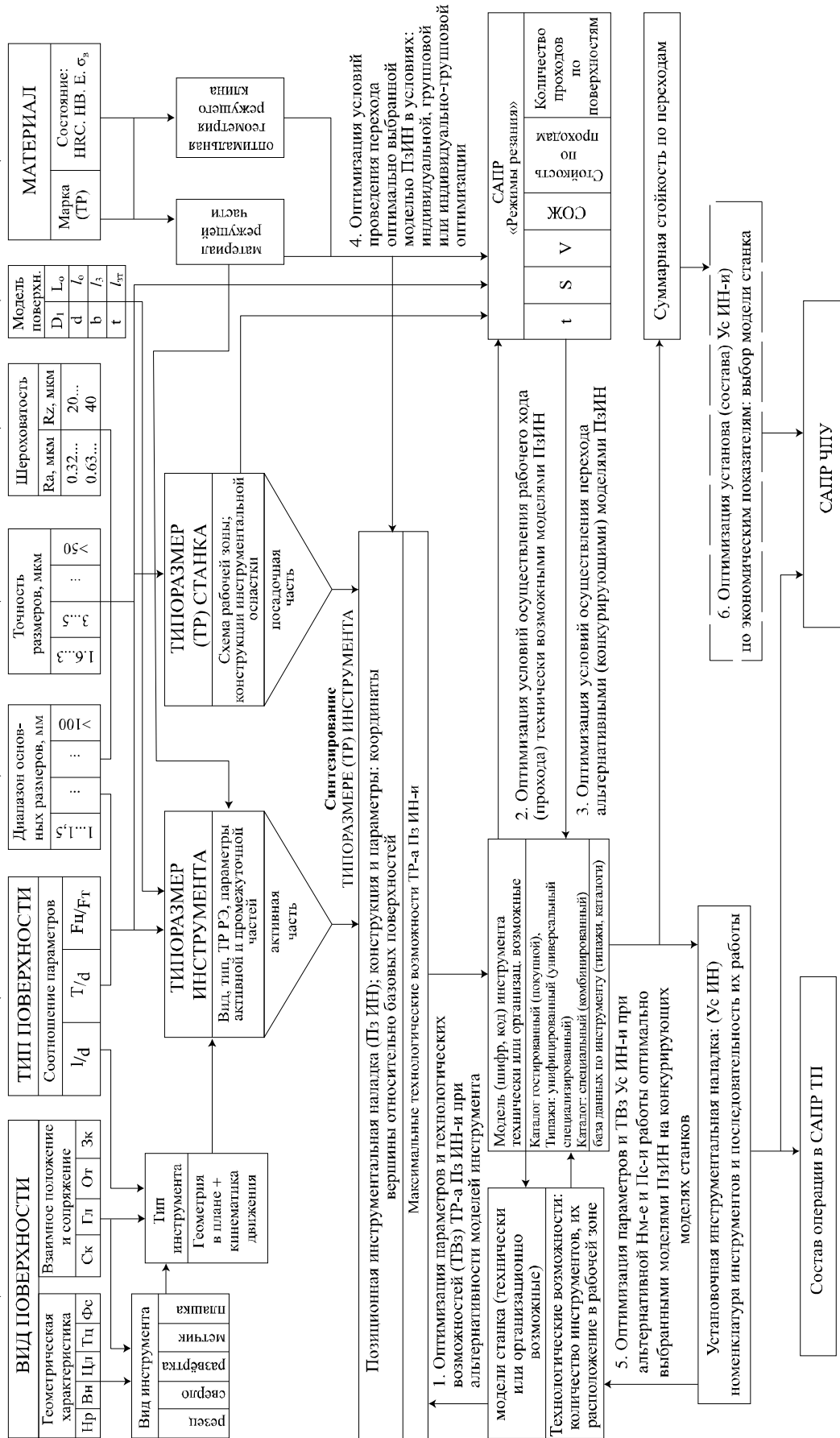
- индивидуально--групповая оптимизация является дополнительной (компромиссной) между индивидуальной и групповой. В этом случае используются ГИН с возможностью замены отдельных позиционных наладок для обработки деталей, подзагружающих групповую наладку до полной загрузки.

ГИН делятся на два вида – контурные (ГИК) и комбинированные (ГИМ). ГИК наладки объединяют в группу наибольшее количество деталей без канавочных и резьбовых поверхностей. Выбор вариантов ГИН выполняется одним из двух методов: универсальному и статистическому – в зависимости от особенностей номенклатуры деталей [11, 13].

Основными **критериями оптимальности** состава и параметров индивидуальных или групповых установочных (детале-операционных) ГИН являются:

БЛОК - СХЕМА 1. ВЫБОР ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ НАЛАДОК ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ТОКАРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Исходная информация: ТИПОРАЗМЕР (ТР) УСТАНОВА (Ус) ДЕТАЛЬ (вход) → операционный эскиз: Номенклатура (Нм), моделей (Мд), обрабатываемых поверхностей



7. Оптимизация номенклатуры и последовательности установов (Ус-ов) – состава детали-операции: синтезирование модели детали-операции

- для УРИ, проводящих финишные (отделочные) проходы – минимальная интенсивность износа, или максимальная площадь обработанной поверхности определенного качества при минимальном или регламентированном размерном износе h_{on} , $\text{дм}^2/\text{мкм}$;

- для УРИ, осуществляющих предварительные проходы – максимально возможная производительность (съём объёма материала в единицу времени Q , $\text{см}^3/\text{мин}$), оцениваемая минимальными машинным временем или себестоимостью обработки.

Все предпринимаемые до настоящего времени попытки оптимизировать технологию механической обработки и условия резания в индивидуальном и групповом производстве практически не могут завершиться успехом, если они не основаны на теории Макарова А.Д., положениях и принципах МБГТ, так как пытаются оптимизировать заведомо неудачный вариант ТП [7, 14, 17-21]. Априори назначаемые периоды стойкости РИ под предлогом того, что так удобно технологам или нормировщикам, без определения оптимальных: скорости резания V_0 и интенсивности относительного поверхностного износа h_{ono} для ТР РИ, является попыткой завуалировать степень незнания (недоисследованности) области применения конкретной модели РИ для модели обрабатываемой поверхности и материала заготовки в конкретном его состоянии: отожженном, нормализованном, улучшенном, закаленном или состаренном [18, 20-23].

На закономерностях и графиках первичной подсистемы разработаны (*впервые в мире*) и даны зависимости качества обработанной поверхности и размерного износа различных ТР УРИ от их стойкости при РОР, указанных в таблицах-матрицах [7, 12, 15-17].

Все резцы из типажа УРИ - сборные с механическим креплением твёрдосплавных многократно перетачиваемых режущих элементов диаметром 1,5...7(9) мм [7, 9-13].

3. Заключение.

Метод синтеза эффективно используется, как при индивидуальной оптимизации обработки крупносерийных деталей, так и при групповой обработке деталей в условиях современного серийного и мелкосерийного многономенклатурного производства [10-13].

Применение метода анализа-синтеза для решения задачи перебора технически возможных вариантов интегрируемых переходов, позиций и установов на профессиональных персональных компьютерах (ПК) при правильном заполнении таблиц-матриц технологом средней квалификации даёт возможность получения оптимального для данного производства ТП механической обработки токарных деталей простой и сложной форм.

Единая система технологических признаков (свойств), учитывающих номенклатуру, диапазон и точность свойств деталей позволяет обеспечить сопоставление, подбор и необходимую эффективность оснастки и РИ при использовании ПК.

Практическое использование системы МБГТ даёт возможность создания базы знаний и баз данных системы автоматизированного сквозного проектирования изделий точного машиностроения, т. е. интегрированных САПР: САЕ/CAD/CAM/CAPP. Это особенно важно для разработки полноценной системы САМ/CAPP (автоматизированная технологическая подготовка производства и проектирование групповых установов ТП).

Преимуществами предлагаемого подхода по сравнению с традиционными являются повышение качества разработанной технологии и сокращение сроков технологической подготовки производства [5-7,9-13]. Внедрение УРИ и РОР вместе с использо-

ванием методики синтеза индивидуальных и ГИН приведёт к гарантированному повышению эффективности машиностроительного и приборостроительного наукоёмкого группового производства при увеличении производительности труда в 2 и более раз [15-17].

Система МБГТ является теоретической основой, позволяющей предсказывать перспективные направления развития технологии и производства, а также исключить неоптимальные, неэффективные технологии. Она создаёт основы для пересмотра физической сущности технологии, её информационного, программно-математического и материального обеспечения. Она позволяет решать задачи Индустрии 3,0 и осуществить переход к цифровой экономике и актуальной концепции 4,0 [11-17, 22-24].

ЛИТЕРАТУРА:

1. Акулович, Л. М. Основы автоматизированного проектирования технологических процессов в машиностроении: учеб. пособие / Л. М. Акулович, В. М. Шелег – Минск: Новое знание. – М.: ИНФРА-М, 2012. – 488 с.
2. Базы знаний интеллектуальных систем / Т. А. Гаврилова, В. Ф. Хорошевский. – СПб.: Питер, 2001. – 384 с.
3. Кондаков, А. И. САПР технологических процессов: учебник для студентов высших учебных заведений / А.И. Кондаков – М.: Академия, 2007. – 272 с.
4. Норенков, И. П. Основы автоматизированного проектирования / И. П. Норенков. – М.: Изд-во МГТУ им. Баумана, 2009.
5. Ракунов, Ю. П. Идеология и структура построения системы многоуровневой базовой технологии / Ю.П. Ракунов, Н.А. Золотова Н. А. // Сб. материалов науч.-практ. конф. «Технологическое обеспечение качества машин и приборов». – Пенза, 2004.
6. Ракунов, Ю. П. Разработка системы многоуровневой базовой технологии / Ю.П. Ракунов // Наукоёмкие технологии в машиностроении. – № 1, 2012. – С. 40-46.
7. Ракунов, Ю. П. Первичная подсистема многоуровневой базовой технологии / Ю.П. Ракунов // Наукоёмкие технологии в машиностроении. – № 3, 2012. – С. 23-31.
8. Справочник технолога // Под ред. А. Г. Сулова. М.: Машиностроение, 2019. – 678 с.
9. Патент № 2226453 РФ, Многократно перетачиваемый резец: / Ракунов Ю. П., Хрульков В. А., Золотова Н. А., Тихонов Н. А. – Бюл. № 10, 2004.
10. Ракунов, Ю. П. Методология построения подсистемы синтеза многоуровневой базовой технологии в групповом производстве / Ракунов Ю.П., Золотова Н. А. // Сб. материалов науч.-практ. конф. «Технологическое обеспечение качества машин и приборов». – Пенза, 2004.
11. Ракунов, Ю. П. Оптимизация синтеза инструментальных наладок для станков с ЧПУ / Ю.П. Ракунов // Конструктор-машиностроитель. – 2010. – № 3. – 5 с.
12. Ракунов, Ю. П. Подсистема синтеза многоуровневой базовой технологии / Ю.П. Ракунов // Наукоёмкие технологии в машиностроении. – № 10, 2012. – С. 36-46.
13. Ракунов, Ю. П. Разработка САПР оптимальных групповых процессов токарной обработки на станках с ЧПУ / Ю.П. Ракунов, В. В. Абрамов // Справочник. Инженерный журнал, приложение. – 2015. – № 7. – С. 1-29.
14. Макаров А. Д. Оптимизация процессов резания / А.Д. Макаров. – М.: Машиностроение, 1976. – 278 с.
15. Ракунов, Ю. П. Управление качеством токарной обработки высокоточных деталей машин / Ю.П. Ракунов // Наукоёмкие технологии в машиностроении. –2013. – № 2. – С. 36-48.

16. Ракунов, Ю. П. Сравнение методов оптимизации режимов резания при механической обработке деталей машин / Ю. П. Ракунов, В. В. Абрамов // Механизация строительства. – 2015. – №11. – С. 22-26.

17. 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.

18. Грубый, С. В. Оптимизация процесса механической обработки и управления режимными параметрами / С. В. Грубый. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. – 149 с.

19. Балла, О. М. Обработка деталей на станках с ЧПУ. Оборудование. Оснастка. Технология / О.М. Балла. – СПб.: Лань, 2015. – 365 с.

20. Звонцов, И. Ф. Разработка управляющих программ для станков с ЧПУ: учебное пособие / И. Ф. Звонцов, К. М. Иванов, П. П. Серебrenицкий – 2-е изд., стер. – СПб.: Лань, 2018. – 588 с.

21. Копылов, Ю. Р. Компьютерные технологии в машиностроении (практикум, CD): учебное пособие / Ю. Р. Копылов. – Воронеж: Научная книга, 2012. – 508 с.

22. Machining: fundamentals and recent advances / Ed. J. Paulo Davim. Springer, 2008. – 361 p.

23. Klocke, F. Manufacturing Processes. Cutting. Springer, 2011. – 500 p.

24. Форсайт «Россия»: Новое индустриальное будущее. Т. 1 / под ред. С. Д. Бодрунова. – СПб: ИНИР, 2018.

Поступила в редколлегию 12.04.2020 г.

УДК 621.85.05-034

Ю. Н. Стрельник, ст. препод., **Д. А. Михайлов**, канд. техн. наук, доц.,
С. А. Матвиенко, канд. техн. наук, доц., **А. В. Лукичев**, канд. техн. наук, доц.,
А. Н. Михайлов, д-р техн. наук, проф.
Донецкий национальный технический университет, г. Донецк, ДНР
Тел. +38 (071) 3076221; E-mail: yura-strelnik@yandex.ru

МЕТОДИКА НАНЕСЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНО-ОРИЕНТИРОВАННОГО ПОКРЫТИЯ НА ШАРОВЫЙ ПАЛЕЦ НАКОНЕЧНИКА РУЛЕВОЙ ТЯГИ АВТОБУСА

В статье разработан функционально ориентированный технологический процесс модифицирования поверхностного слоя сферического шарового пальца на базе ионно-плазменного нитридо-титанового покрытия с переменной толщиной, зависящей от степени износа функциональных участков рабочей поверхности. Разработан граф нанесения покрытия.

Ключевые слова: толщина покрытия, осаждение, микротвердость, напыление

Y. N. Strelnik, D. A. Mikhaylov, S. A. Matvienko, O. V. Lukichov, A. N. Mikhaylov

TECHNIQUES FOR EXPERIMENTAL STUDIES OF FUNCTION-ORIENTED COATING ON BALL STUD OF THE TIE ROD OF THE BUS

The article describes a functionally oriented technological process for modifying the surface layer of the sphere of a ball finger based on ion-plasma nitride-titanium coatings with a variable thickness, depending on the degree of wear of functional sections of the working surface. A coating graph has been developed.

Keywords: coating thickness, deposition, microhardness, deposition

1. Введение.

Работоспособность шарнирных соединений узлов транспортных машин во многом определяется составом, структурой и физико-механическими свойствами материала поверхностного слоя (ПС) [1]. При этом повышение ресурса шарнирных соединений, в ряде случаев, обеспечивается технологическими методами, а именно, за счет формирования параметров качества ПС. С учетом того что наиболее частой причиной отказов шарнирных соединений является износ рабочих поверхностей деталей, наиболее перспективным методом решения данной проблемы является нанесение износостойкого слоя осаждением упрочняющих покрытий [2]. Качество покрытий является совокупностью их свойств, определяющих ресурс деталей в зависимости от их служебного назначения. Среди методов физического нанесения покрытий наиболее перспективным является их осаждение из плазмы вакуумно-дугового разряда [3, 4]. Следует отметить, что для деталей машин, для повышения их ресурса, широко используются многослойные покрытия.

Применение многослойного покрытия сложной структуры, выполняемой на базе нитридов различных металлов VI группы Периодической таблицы Д. И. Менделеева, позволяет значительно повышать эксплуатационные свойства деталей. Например, покрытия, на основе нитрида титана, имеют высокую микротвердость, находящуюся в диапазоне 21,0...24,0 ГПа. При этом применение многослойных покрытий, например, структурируемых из слоев из нитрида титана TiN и нитрид алюминий титана TiAlN дополнительно повышает эксплуатационные свойства деталей машин [3].

В результате проведенных исследований, установлено, что в процессе эксплуатации шарнирных соединений рулевых тяг автобусов МАЗ, ее функциональные элементы изнашиваются неравномерно в результате механического износа [5], что значительно уменьшает срок службы шарнирных соединений и повышает вероятность возникновения аварийных ситуаций. Для решения вопросов повышения ресурса эксплуатации рулевых тяг автобуса МАЗ, в данной работе предложено применение специальных функционально-ориентированных покрытий (ФОП) [6, 7], выполняемых в данной работе на основе вакуумных ионно-плазменных технологий.

Выполненные исследования показывают, что вопрос использования многослойных ФОП, для отделочно-упрочняющей обработки шаровых пальцев шарнирных соединений рулевого управления транспортных средств, мало изучен и требует дальнейших исследований. Это особенно актуально для шаровых поверхностей шарниров, в частности, рулевых тяг, где имеются переменные скорости относительного скольжения элементов и возникают неравномерные износы поверхностей. Поэтому в этом случае необходимо обеспечивать функционально-ориентированных свойств [6] шаровых пальцев наконечников рулевых тяг автобусов МАЗ, с учетом их условий эксплуатации, применять вакуумное ионно-плазменное нанесение многослойного ФОП [7].

Целью данной работы является разработка методики формирования многослойного ФОП на шаровой палец наконечника рулевой тяги автобуса МАЗ, эксплуатация которого характеризуется переменными скоростями относительного скольжения элементов и неравномерным износом ПС, базирующейся на технологическом обеспечении процессов.

Поэтому в данной работе планируется решить следующие задачи: исследовать условия эксплуатации и особенности реализации ФОП шаровых пальцев; разработать методику и технологическое обеспечение реализации многослойного ФОП; разработать технологический процесс вакуумного ионно-плазменного нанесения многослойных ФОП; провести эксперимент по нанесению ФОП и исследовать толщины покрытия различных функциональных зон рабочей поверхности шарового пальца.

2. Изделие и основные особенности реализации многослойного ФОП

Деталь «шаровой палец» является ответственным и наиболее изнашиваемым элементом наконечника рулевой тяги автобуса МАЗ. В процессе работы шарнирное соединение наконечника с деталью «шаровой палец» передает высокие динамические нагрузки. Износ сферической поверхности детали «шаровой палец» приводит к увеличению зазора между сферическими поверхностями, разрушению наконечника и, как следствие, к аварийным ситуациям. С целью повышения износостойкости детали «шаровой палец», обеспечения безопасности движения, увеличения срока службы изделия, повышения надежности и увеличения периода межремонтного ресурса рулевой тяги техническими требованиями к детали авторами предусматривается осаждение износостойкого многослойного покрытия TiN и TiAlN на сферической поверхности. Свойства покрытий представлены в таблице 1.

Для выполнения экспериментальных исследований по определению особенностей нанесения вакуумных ионно-плазменных ФОП на рабочие поверхности шаровых шарниров изделия были выбраны натурные образцы шарового пальца (рисунок 1) производства компании «СпецМаш» с твердостью рабочей части (сфера) HRC 50...53, весом 0,6 кг и изготовленного из легированной хромистой стали 40X. В табл. 1 представлены свойства покрытий.

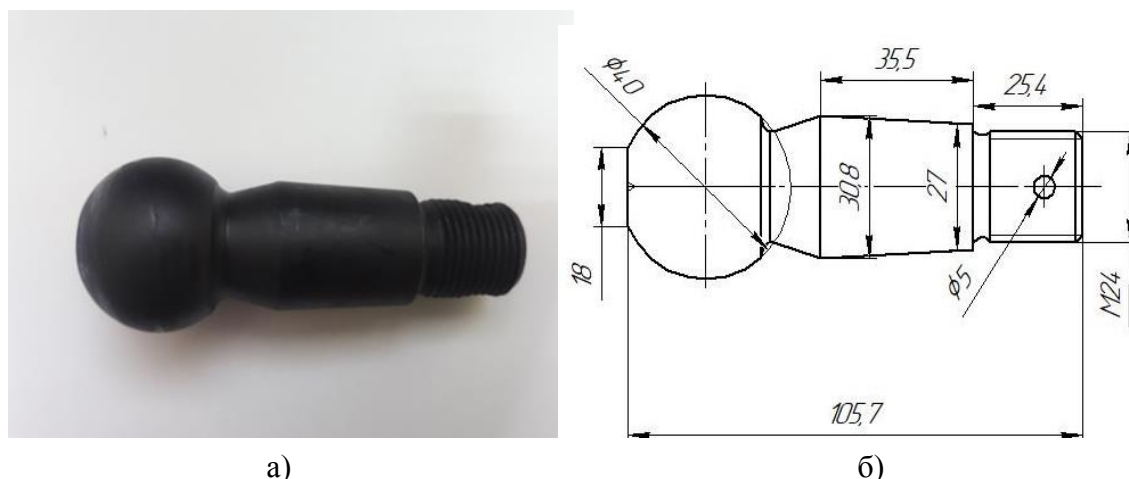


Рисунок 1. Шаровой палец: а - общий вид; б - рабочий эскиз

Таблица 1. Свойства покрытий.

Тип покрытия	Цвет	Микротвердость, ГПа	Рекомендуемая толщина, мкм	Коэффициент сухого трения	Температура нанесения, °С
TiN	Золотистый	22-24	6	0,9-0,92	280-320
TiAlN	Золотистый, с оттенками коричневого	25-27	6	0,87-0,9	280-320

Обеспечение необходимой шероховатости поверхности образцов высокоточных деталей перед осаждением покрытия (полирование до $R_a = 0,04 \dots 0,06$ мкм) производилось на станке с применением войлочного круга.

Технологический процесс (ТП) отделочной обработки рабочих поверхностей шарового пальца (до нанесения покрытия) включал выполнение следующих операций:



Рисунок 2. Шаровой палец после полировки сферической поверхности пальца.

(рис. 2), обезжиривание и подготовка сферической поверхности пальца к нанесению покрытия, полирование сферической поверхности, ионная бомбардировка, нанесение многослойного ФОП.

При полировании припуск на обработку составил от 0,002 до 0,008 мм, в качестве абразивных материалов использованы тонкие микрошлифпорошки с зернистостью порошка M10.

Процесс нанесения подслоя проходил при следующих параметрах (таблица 2). Полный контроль качества покрытий ионно-плазменного напыления включает следующие операции: визуальный осмотр; контроль на микротвёрдость; контроль толщины покрытия.

Таблица 2. Параметры процесса осаждения нитрид-титанового покрытия

№ п/п	Наименование параметра	Значение
1	Давление, Па	$1,1 \cdot 10^{-1}$
2	Ток дугового испарителя, А	90
3	Напряжение дугового испарителя, В	120
4	Мощность, кВт	50
5	Время нанесения одного слоя покрытия, с	350
6	Полный цикл нанесения одного слоя покрытия	2 часа 30 минут



Рисунок 3. Общий вид установки ННВ 6.6-И1

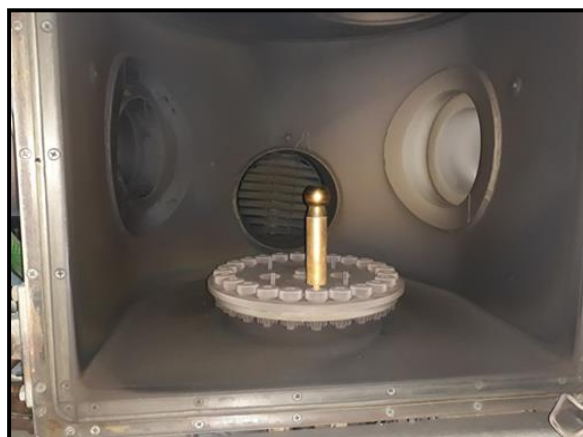


Рисунок 4. Вакуумная камера установки ННВ 6.6-И1 с шаровым пальцем

Микротвердость напылённого ПС шарового пальца измерялась с помощью микротвердомера ПМТ - 3 (ГОСТ 9450-76). Оптимальная твердость нитрид-титановых покрытий находится в диапазоне 21,0...24,0 ГПа. Шероховатость поверхности после осаждения покрытия должна соответствовать $R_a = 0,05 \dots 0,06$ мкм.

3. Оборудование и технологическое обеспечение

Вакуумное ионно-плазменное покрытие изделий выполнено на установке ННВ 6.6-И1 (рис. 3). Установка ННВ 6.6-И1 предназначена для осаждения упрочняющих одно- и многослойных покрытий на детали диаметром до 200 мм и длиной до 250 мм из плазмы вакуумно-дугового разряда. В вакуумной камере на вращающемся валу монтируется планшайба, на которой закрепляются напыляемые детали (рис. 4).

Для напыления многослойного покрытия применялись три катода (рис. 5). При этом слои ФОП формировались из TiN и TiAlN.

Стол имеет 24 гнезда, в каждое из которых устанавливается по одному приспособлению с деталью. Планетарный стол осуществляет вращение заготовок вокруг своей оси и оси планшайбы. Это обеспечивает равномерность нанесения слоев покрытия.

При напылении покрытий применялся азот газообразный особой чистоты ГОСТ 9293-74. Объемная доля азота не менее 99,999 %. Объемная доля водорода не более 0,0002 %. Объемная доля суммы углеводородсодержащих соединений не более 0,0003 %.

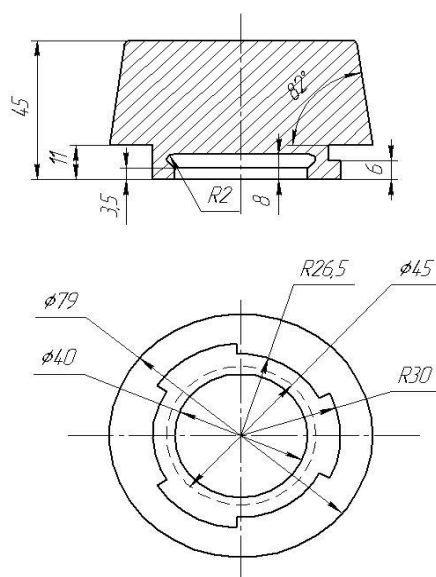


Рисунок 5. Схема катода установки ННВ 6.6–И1.

4. Структура технологического процесса.

Схема ТП осаждения покрытия из плазмы вакуумно-дугового разряда представлена на рис. 6.

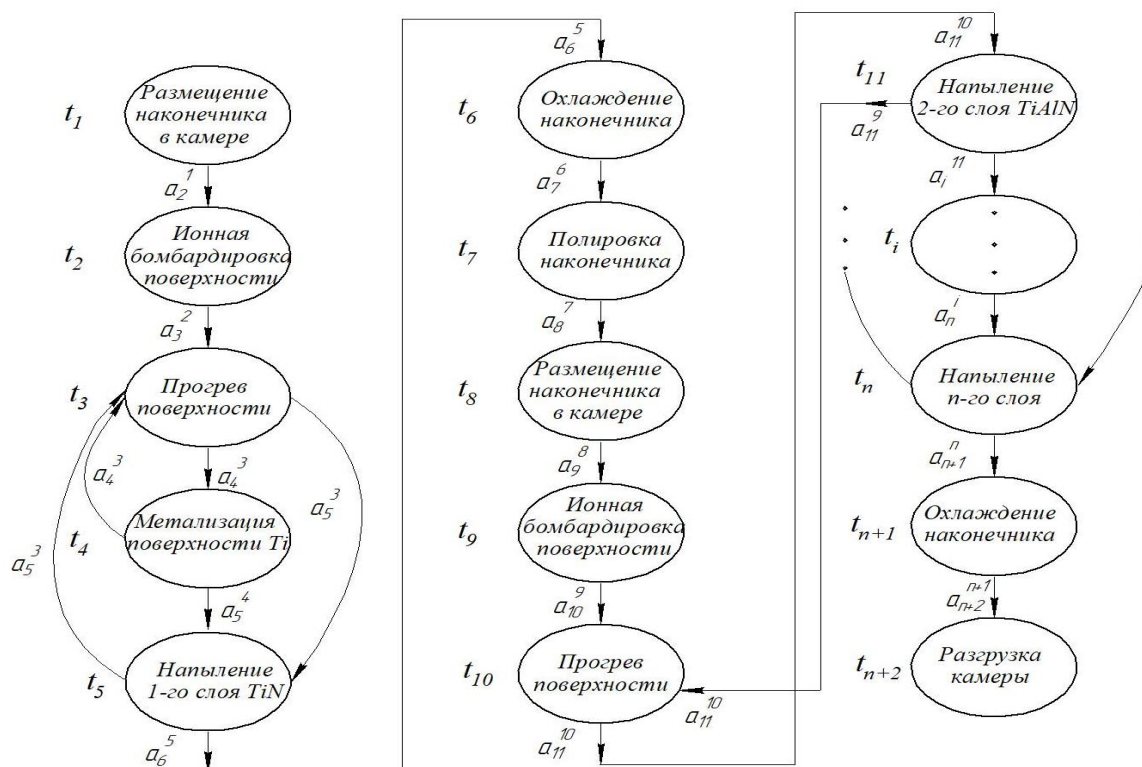


Рисунок 6. Граф ТП нанесения покрытия на сферическую поверхность шарового пальца наконечника рулевой тяги.

На базе графа ТП нанесения многослойных покрытий на основе теории ФОРП разработан алгоритм (рис. 6) полного состава всех переходов ТП ионно-плазменного напыления сферической поверхности наконечника рулевой тяги (этап отделочно-упрочняющей обработки) в вакуумной ионно-плазменной установке (в виде графа $G(T, A)$): T – это множество вершин графа – операции технологического процесса; A – упорядоченные пары вершин – отношения между операциями). После полировки для последующего нанесения вакуумных ионно-плазменных покрытий выполнен процесс обезжиривания ПС.

Деталь устанавливается в планетарный механизм (нержавеющая оправка). Планетарный механизм устанавливается в камеру. После установки планетарного механизма камера закрывается. Обработка происходит при вращении заготовки в планетарном механизме. На первой стадии происходит очистка поверхностей шарнира от примесей и окислов (ионно-плазменная бомбардировка). Затем, осуществляется прогрев детали до нужной температуры, для нанесения слоя титана, функционально являющегося связкой базового металла с покрытием, которая наносится в режиме опорного напряжения, т.е. меняется полярность. Прогрев осуществляется до температуры 250 ... 300 °С. После с соответствующими режимами наносятся слои: 1 слой – чистый титан на всю поверхность сферы (1 мкм); 2 слой – нитрид титан на всю поверхность сферы (4-6 мкм); 3 слой – титан-алюминий-нитрид на пояс, подверженный максимальному износу. Угол при нанесении слоёв – 90 градусов. После нанесения 2-го из указанных слоев устанавливается защитный экран на функционально определенные зоны, не подлежащие к нанесению 3 слоя. При этом наносится слой из NiAlN. Обработанные пальцы после нанесения 2 и 3 слоя представлены на рисунке 7, топография покрытий на рисунке 8.

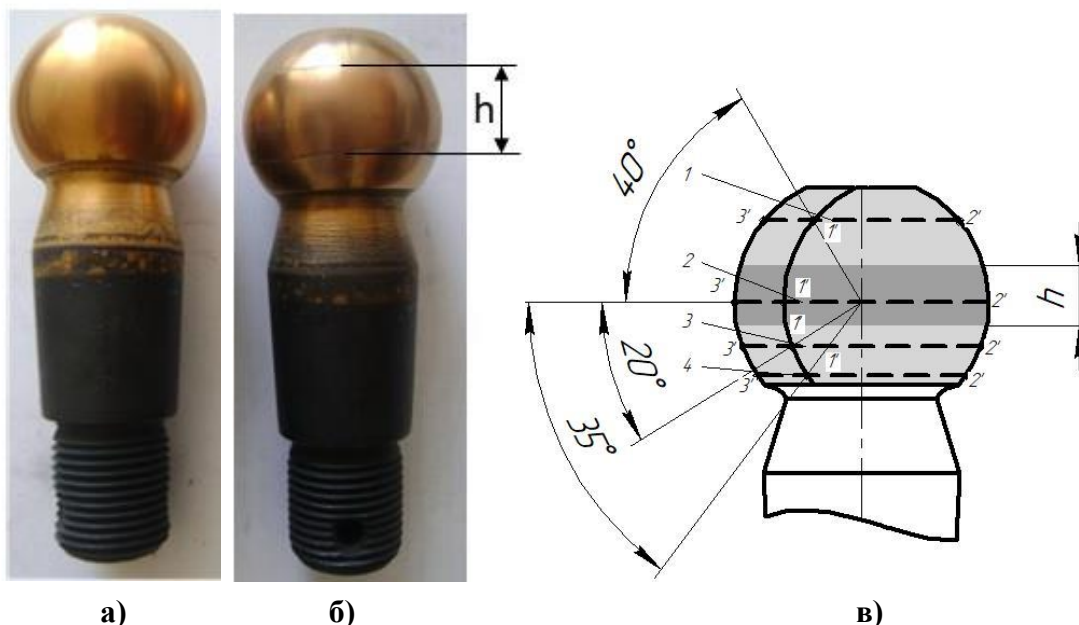


Рисунок 7. Натурные образцы шаровых пальцев и схема измерения: а - после осаждения покрытия TiN; б – TiAlN; в – зоны измерения толщины покрытия

Точки измерения толщины нанесенного при экспериментальном исследовании покрытия представлены на рисунке 7 и в таблице 3.

Таблица 3. Результаты измерения толщины осажденного покрытия

Номер плоскости замеров	Углы определения плоскостей измерения	Точки измерений толщины осажденного слоя, мкм			
		1	2	3	4
1	40 ⁰	6	5	6	6
2	0 ⁰	12	12	11	12
3	- 20 ⁰	12	12	12	12
4	- 35 ⁰	6	6	5	6

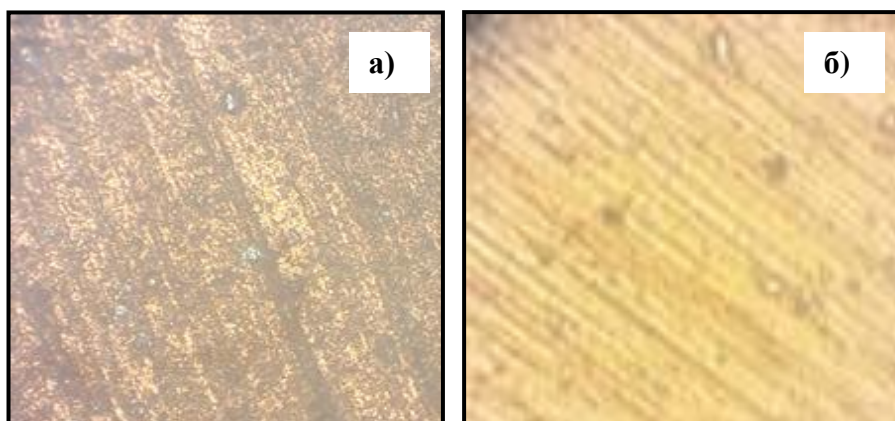


Рисунок 8. Общий вид слоев покрытия под микроскопом (увеличение ×200): а - слой нитрид-алюминиевого титанового покрытия, б - слой нитрид титанового покрытия

На рис. 8 представлен общий вид слоев покрытия под микроскопом (увеличение ×200): рис. 8, а - слой нитрид-алюминиевого титанового покрытия, рис. 8, б - слой нитрид титанового покрытия.

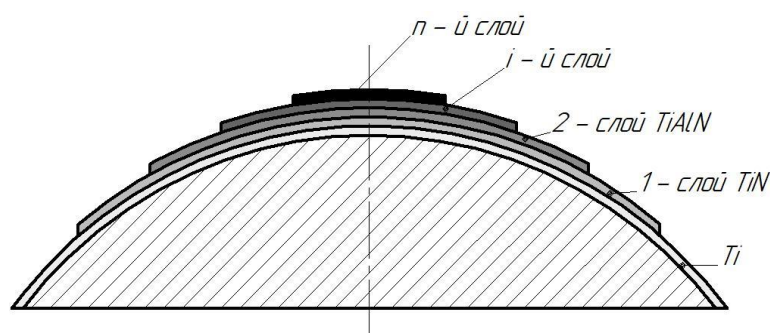


Рисунок 9. Структурная схема многослойного ФОП

На рис. 9 представлена структурная схема многослойного ФОП с *n* слоями покрытия. Эта схема является универсальной. На базе этой схемы выполняется выбор числа слоев ФОП и составление структуры ТП напыления ФОП (рис. 6).

5. Выводы.

Таким образом, в данной работе проведена разработка методики формирования многослойного ФОП на шаровой палец наконечника рулевой тяги автобуса МАЗ, эксплуатация которого характеризуется переменными скоростями относительного скольжения элементов и неравномерным износом ПС, базирующейся на технологическом обеспечении процессов.

В результате выполненных исследований представлено следующее:

1. В результате выполненных исследований в работе установлено, что ПС шаровой опоры изнашивается не равномерно. Это обусловлено особенностями эксплуатации шарниров и неодинаковыми скоростями относительного скольжения элементов.

2. В работе разработана методика и технологическое обеспечение реализации многослойного ФОП.

3. В работе разработан алгоритм технологического процесса вакуумного ионно-плазменного нанесения многослойных ФОП.

4. В представленной работе выполнены экспериментальные исследования по нанесению ФОП и приведены данные исследований этих покрытий

ЛИТЕРАТУРА:

1. Журавлева, П. Л. Исследование структуры однослойных покрытий TiN и многослойных покрытий TiN/ZrN [Текст] / П. Л. Журавлева, И. А. Тренингов, С. В. Сбитнева, А. А. Алексеев, Д. С. Горлов // Российские нанотехнологии. – 2010. – Т. 5. – № 9 – 10. – С. 112 – 116.

2. Аксенов, И. И. Покрытия, полученные конденсацией плазменных потоков в вакууме [Текст] / И. И. Аксенов и [др.] // Украинский физический журнал. – 1989. – Т. 24, №4. – С. 515 – 525.

3. Ali, M. Effect of cathodic arc PVD parameters on roughness of TiN coating on steel substrate [Текст] / M. Ali, E. Hamzah, I.A. Qazi, M.R.M. Toff // Current Applied Physics. – 2010. – Vol. 10, Issue 2. – С. 471 – 474.

4. Суслов, А. Г. Технологическое обеспечение и повышение эксплуатационных свойств деталей и их соединений [Текст] / А. Г. Суслов, В. П. Фёдоров, О. А. Горленко и др. – М.: Машиностроение, 2006. – 448 с.

5. Михайлов, А. Н. Расчет относительных перемещений в системе втулка-палец шаровой опоры / А. Н. Михайлов, А. Н. Голубов // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. – № 4(55), 2016. – С. 10-17.

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

7. Пат. 2718877 РФ. С23С 14/04. Способ нанесения функционально-ориентированного износостойкого покрытия на лопатку газотурбинного двигателя / А. Н. Михайлов, Д. А. Михайлов, В. А. Михайлов и [др.]. – № 2018107164; заявл. 26.02.18, Бюл. № 11, 15.04.2020. – 7 с.

Поступила в редколлегию 23.04.2020 г.

УДК 621.771.001.57

А. В. Яковченко, д-р техн. наук, проф., **В. В. Пилипенко**, аспирант,
Донецкий национальный технический университет, ДНР
Тел./Факс: +38 (071) 3348235; E-mail: mond1991@mail.ru

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СИЛЫ ПРИ НЕСТАЦИОНАРНОМ ПРОЦЕССЕ ПРОКАТКИ ФЛАНЦА С НАРУЖНЫМ ГРЕБНЕМ НА КОЛЬЦЕПРОКАТНОМ СТАНЕ

В статье представлены результаты экспериментальных измерений текущих параметров фланца с наружным гребнем и процесса его прокатки на промышленном кольцепрокатном стане. Построены графические зависимости силы прокатки и толщины кольца от его текущего внутреннего диаметра, а также скорости движения валка-оправки и скорости роста внутреннего диаметра кольца от времени.

Ключевые слова: кольцепрокатный стан, фланец с наружным гребнем, нестационарный процесс прокатки, экспериментальные исследования, сила прокатки.

A. V. Yakovchenko, V. V. Pilipenko

EXPERIMENTAL STUDIES OF THE FORCE DURING THE NON-STATIONARY PROCESS OF ROLLING A FLANGE WITH AN EXTERNAL RIDGE ON A RING ROLLING MILL

The article presents the results of experimental measurements of the current parameters of a flange with an external ridge and the process of rolling it on an industrial ring rolling mill. The graphical dependences of the rolling force and thickness of the ring on its current inner diameter, as well as the speed of movement of the mandrel roll and the growth rate of the inner diameter of the ring on time are constructed.

Keywords: ring rolling mill, flange with an external ridge, non-stationary rolling process, experimental studies, rolling force.

1. Введение

Различные типы колец с наружным гребнем (локомотивные и трамвайные бандажи, а также фланцы) составляют значительную часть сортамента кольцевых изделий. Освоение их производства связано с моделированием процессов прокатки колец [1–3 и др.]. Нестационарный характер процесса прокатки колец в значительной мере определяет его сложность. Для проверки адекватности теоретических разработок необходима экспериментальная информация. В технической литературе имеются результаты экспериментальных исследований процессов прокатки колец из углеродистых сталей [4–6 и др.]. В работе [7] представлены экспериментальные данные, полученные в промышленных условиях при прокатке прямоугольных в сечении колец, а в работе [8] – бандажей. Работа направлена на получение аналогичной экспериментальной информации для условий прокатки кольца с наружным гребнем – фланца из стали 60.

Цель работы состоит в получении экспериментальных данных на промышленном кольцепрокатном стане при прокатке фланца с наружным гребнем. Поставлена задача построения на базе экспериментальных данных графических зависимостей силы прокатки и толщины кольца от его текущего внутреннего диаметра, а также скорости движения валка-оправки и скорости роста внутреннего диаметра кольца от времени.

2. Методика проведения эксперимента

Схема промышленного радиально-осевого кольцепрокатного стана при прокатке фланца с наружным гребнем представлена на (рис. 1).

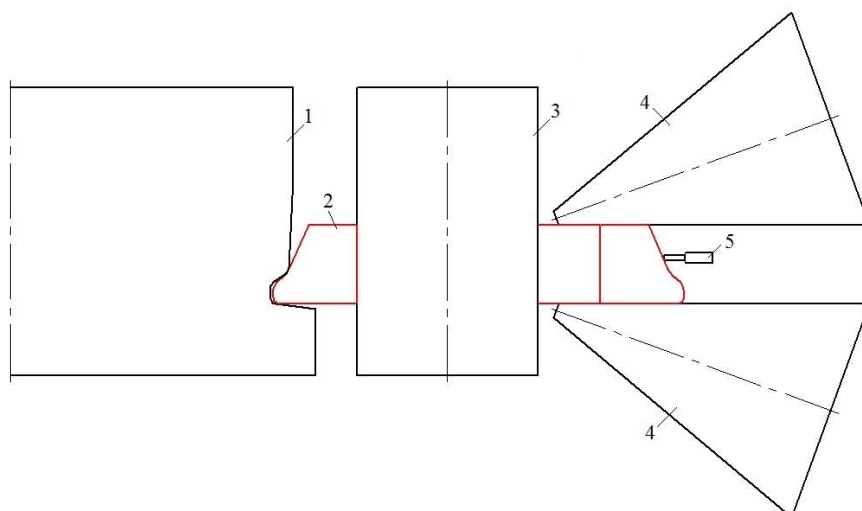


Рисунок 1. Схема радиально-осевого кольцепрокатного стана: 1 – главный приводной валок; 2 – прокатываемое кольцо с наружным гребнем; 3 – валок-оправка; 4 – наклонные (конические) валки; 5 – устройство для измерения наружного диаметра кольца

При прокатке кольцо формируется между главным приводным валком и неподвижным валком-оправкой, которые установлены вертикально. Обжатие стенки кольца и соответствующее увеличение его диаметра осуществляется перемещением валка-оправки в сторону главного валка с помощью гидравлического привода. Стан имеет два конических валка, выполняющих обжатие кольца по высоте, которые установлены диаметрально противоположно вертикальным валкам. Кольцо центрируется роликами, которые удерживают его на оси стана и обеспечивают минимальную овальность.

Значения диаметров вертикальных валков и скорости прокатки в эксперименте, а также максимально допустимые параметры, характеризующие работу стана, представлены в табл. 1.

Таблица 1. Техническая характеристика кольцепрокатного стана

Параметры	Значения параметров
Диаметр главного приводного валка (max), мм	1100
Диаметр валка-оправки, мм	250
Скорость прокатки, м/с	1,5
Мощность привода главного валка, кВт	630
Сила прокатки в вертикальных валках, МН	1,5
Сила прокатки в наклонных валках, МН	1,25
Скорость движения валка-оправки, мм/с	15

Разработаны калибровка для кольцепрокатного стана и заготовочного пресса (рис. 2), на котором выполняется штамповка кольцевой заготовки с предварительно подготовленным гребнем. Температурный интервал прокатки 1145 – 1090 °С.

Значения толщины кольца и его внутреннего диаметра в процессе прокатки получили на базе показаний импульсных фотоэлектрических датчиков ПДФ-3, установленных стационарно на кольцепрокатном стане. Точность измерений толщины кольца –

0,01%, внутреннего диаметра – 0,1%. Значения сил прокатки в радиальном очаге деформации получили на базе показаний измерительных преобразователей давления в электрические сигналы, установленных стационарно на кольцепрокатном стане (погрешность измерений $\pm 0,1\%$) [8]. Температуру металла в начальный и конечный моменты прокатки измеряли оптическим пирометром.

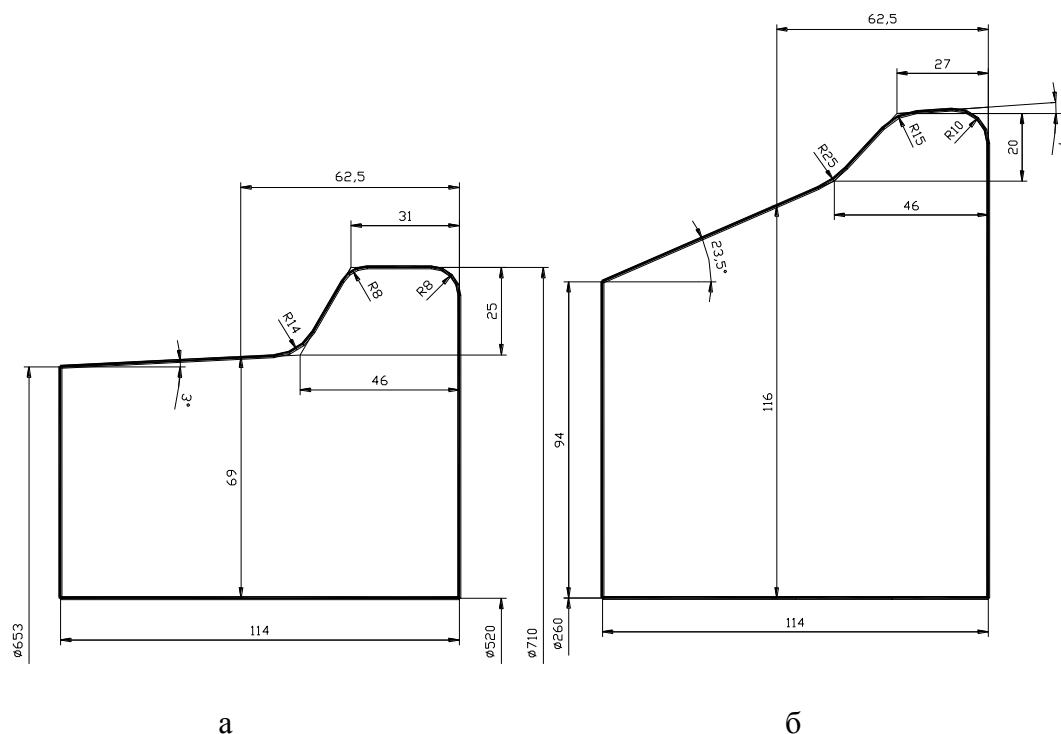


Рисунок 2. Контуры радиальных сечений фланца (а) и кольцевой заготовки (б)

3. Результаты экспериментальных исследований

Графические зависимости скорости роста внутреннего диаметра кольца, толщины кольца и силы прокатки в зависимости от времени представлены на рис. 3, 4.

На 1-ом этапе прокатки при изменении времени t от нуля до 3,3 с выполнено устранение разнотолщинности кольцевой заготовки, которая была получена при ее штамповке и прошивке центрального отверстия.

На 2-ом основном этапе прокатки, который характеризуется интенсивным радиальным обжатием металла, время t изменяется от 3,3 с до 21,1 с. Вначале при изменении времени t от 3,3 с до 9,9 с выполняется выкатка гребня фланца. При этом, несмотря на постоянный рост силы прокатки до 587,2 кН, скорость роста внутреннего диаметра кольца снижается до 3,2 мм/с, что связано с тем, что суммарное (от вертикальных валков) радиальное обжатие металла реализуется преимущественно главным валком.

На следующей стадии (t изменяется от 9,9 с до 14,5 с) при росте силы прокатки до максимального значения, равного 770,6 кН, скорость роста внутреннего диаметра кольца выросла вначале до 9 мм/с, а затем после небольшого её уменьшения выросла до 8,6 мм/с. При этом толщина кольца уменьшилась с 99,8 мм до 78,5 мм, что соответствует значительному радиальному обжатию, равному 21,3 мм (см. рис. 4, а). Следствием интенсивного радиального обжатия металла и увеличения скорости роста диаметра кольца является рост овальности кольца и его разнотолщинности, что проявляется в

«просаживании» на следующей стадии прокатки (при изменении t от 14,5 с до 16,6 с)) скорости роста внутреннего диаметра кольца с 8,6 мм/с до 5,4 мм/с.

На 3-ем этапе прокатки при изменении t от 21,1 с до 25 с обеспечивается переход от 2-го (основного) этапа, связанного с интенсивной деформацией металла, к последнему 4-му этапу, на котором получают требуемые размеры готового кольца.

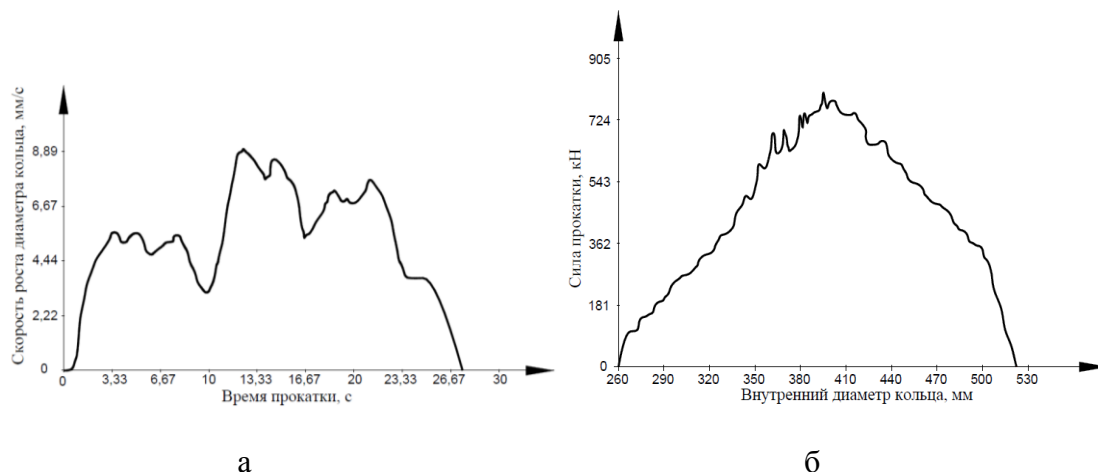


Рисунок 3. Зависимость скорости роста внутреннего диаметра кольца (а) от времени и силы прокатки (б) от текущего внутреннего диаметра кольца

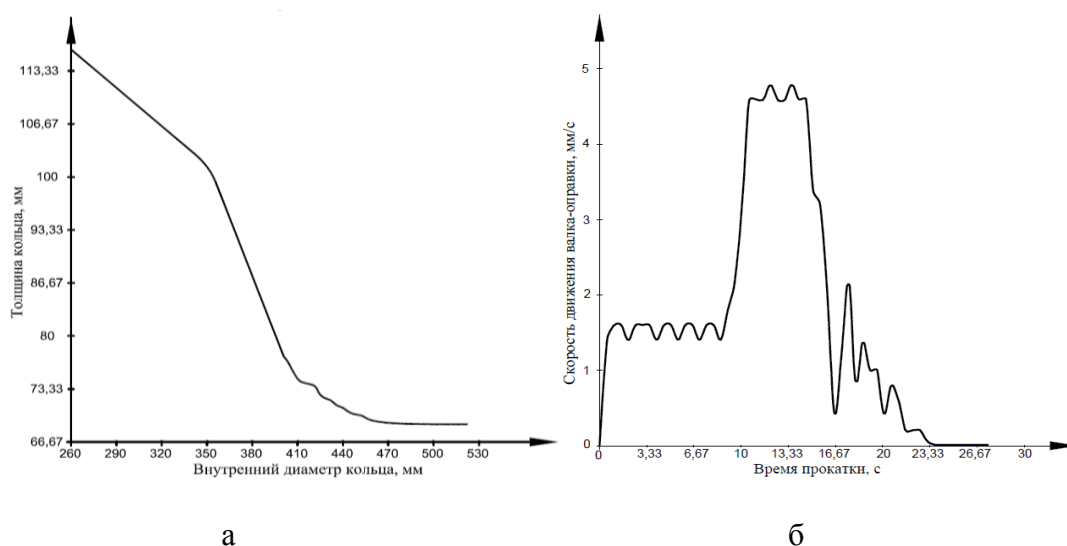


Рисунок 4. Зависимость толщины кольца (а) от его текущего внутреннего диаметра и скорости движения валка-оправки (б) от времени

На 4-ом, заключительном этапе прокатки, (при изменении t от 25 с до 27,4 с) сила прокатки и скорость роста внутреннего диаметра продолжили снижаться. При достижении внутреннего диаметра кольца ~ 515 мм был начат сброс давления рабочей жидкости в рабочих гидроцилиндрах стана, что привело к падению до нуля силы прокатки (см. рис. 3, б) и, соответственно, уменьшению до нуля скорости роста внутреннего диаметра кольца (см. рис. 3, а).

Наружный диаметр кольца в процессе его прокатки замерялся на расстоянии 62,5 мм от боковой (гребневой) поверхности кольца (см. рис. 1). На указанном расстоянии замерялась и толщина кольца в процессе прокатки. Высота исходной кольцевой

заготовки (рис. 2, б) равна высоте готового кольца (рис. 2, а). Поэтому в процессе прокатки зазор между наклонными валками выдерживался постоянным, равным 114 мм. При этом на каждом обороте кольца наклонными валками выполнялось обжатие уширения, которое получали от радиального обжатия металла вертикальными валками.

4. Выводы

Выполнены экспериментальные исследования силовых и геометрических параметров процесса прокатки фланца с наружным гребнем на радиально-осевом кольце-прокатном стане. Точность измерений толщины кольца – 0,01%, внутреннего диаметра – 0,1%. Значения сил прокатки в радиальном очаге деформации получены на базе показаний измерительных преобразователей давления в электрические сигналы с погрешностью измерений $\pm 0,1\%$. Построенные графические зависимости силы прокатки и толщины кольца от его текущего внутреннего диаметра, а также скорости движения валка-оправки и скорости роста внутреннего диаметра кольца от времени показали характер изменения параметров при нестационарном процессе прокатки.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Яковченко, А. В. Распределение радиального и осевого обжатий в процессе прокатки кольцевых изделий / А. В. Яковченко, А. Ю. Лоскутов, Н. И. Ивлева // Совершенствование процессов и оборудования обработки давлением в металлургии и машиностроении. – 2000. – С. 292-297.
2. Процив, Ю. В. Расчет суммарных степеней деформации при многопереходной раскатке кольцевых заготовок / Ю. В. Процив // Производство проката. – 2012. – № 3. – С. 25 – 27.
3. Панин, В. Г. Изучение выкатываемости фланцевых колец и факторов интенсификации их формообразования / В. Г. Панин // Заготовительные производства в машиностроении. – 2012. – № 9. – С. 37-40.
4. Husmann, T. Online-analysis of process-data to avoid ovality in radial-axial ring rolling processes / T. Husmann, S. Husmann, B. Kuhlenkötter // Proceedings of the 20th International ESAFORM Conference on Material Forming, 26-28.04.2017, Dublin (Ireland). – Dublin: AIP Publishing, 2017. – 6 p.
5. Husmann, T. Determination of influencing factors on ring climbing in radial-axial ring rolling via design of experiments / T. Husmann, B. Kuhlenkötter // Advanced Materials Research. – 2016. – Vol. 1140. – P. 19–26.
6. Sun, B. Numerical and experimental investigations on the effect of mandrel feeding speed for high-speed rail bearing inner ring / B. Sun, J. Xu, C. Xing // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2019. – № 100 (5-8). – P. 1993 – 2006.
7. Яковченко, А. В. Экспериментальные исследования энергосиловых и температурных параметров при нестационарном процессе прокатки колец / А.В. Яковченко // Металл и литье Украины. – 1997. – №1. – С. 44-45.
8. Яковченко, А. В. Экспериментальные исследования процесса прокатки локомотивных бандажей на одном стане / А. В. Яковченко, А. Ю. Лоскутов // Металл и литье Украины. – 2002. – №1-2. – С. 52-54.

Поступила в редколлегию 21.03.2020 г.

УДК 621.793.71

F. I. Panteleenko, Doc. of Techn. Sciences, Prof., **V. A. Okovity**, Cand. of Techn. Sciences,
O. G. Devoino, Doc. of Techn. Sciences, Prof., **A. S. Volodko**, **A. F. Panteleenko**

Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

Tel / Fax: (017)293-92-23; E-mail: scvdmed@bntu.by

FORMING COATINGS FROM SELF-FLUXING POWDER BASED ON STEELS OF AUSTENITE CLASS CLADDING CERAMICS

To obtain wear-resistant coatings with high heat resistance and resistance to aggressive media, with high hardness and adhesive strength at elevated temperatures, resistance to shock loads, low residual stresses and uniformity of structure, it is necessary to introduce chromium and tungsten carbides with cladding the protective materials of the starting carbides susceptible to high oxidation during thermal spraying to maintain chemical composition. As a result, wear-resistant coatings are formed which are effective during molecular-mechanical and abrasive wear under adverse friction conditions (boundary lubrication or lack of lubricant, increased temperature effects) due to the effect of reducing surface friction of coatings, which allows reducing the wear rate by microcontact setting, the process which is most common in tribological conjugations

Keywords: *brittleness, crack resistance, wear resistance, workability, economic factors, self-fluxing powder, austenitic steel*

Introduction. Tungsten carbide with a hexagonal crystal lattice has a very narrow region of homogeneity, the crystal lattice is unstable when carbon atoms are removed from it, which occurs during thermal spraying, it is highly oxidizable due to the formation of a fusible volatile oxide film on the surface. also, that with increasing arc power and sputtering distance, the oxidation of carbon in the sprayed particles substantially increases. Some reduction in carbon loss was achieved with the use of protective devices on the plasmatron. The reduction in carbon loss during sputtering in an open atmosphere was mainly ensured by applying nickel plating to the particles. At the same time, the introduction of ductile metal into the coating was achieved [1-6]. The application of nickel plating to tungsten carbide particles by chemical and electrochemical methods with a thickness of up to 5 μm did not provide effective protection of the carbide from carbon oxidation. Experiments have shown the creep of a shell from a particle during its heating and transfer. The optimum thickness is 15-20 μm . The microhardness of the phases is in a wide range: from $(3-4) \times 10^3$ MPa to $(40-50) \times 10^3$ MPa. Moreover, the hardness is HV 1000-1450 MPa, porosity 3-7% (vol.). The maximum hardness of the coating is achieved at 30-40% (but the mass) of nickel in clad carbide. In this case, the maximum values of productivity and instrumentation are achieved. [7-9].

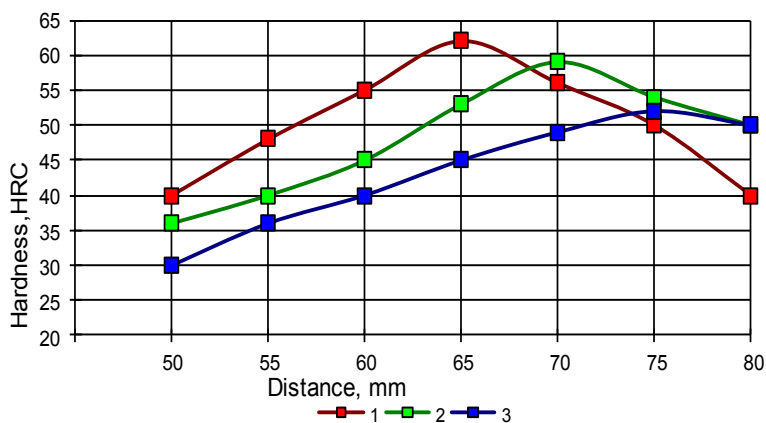
Chromium carbide with a rhombic crystal lattice has a wide area of homogeneity; during oxidation, a protective film is formed on the surface from strong oxides that impede oxidation in depth. It is distinguished by the highest heat resistance, resistance to aggressive environments, high hardness at elevated temperatures. The oxidation process of a chromium carbide particle stops when a Cr_2O_3 oxide is created on its surface of sufficient thickness and continuity. As practice has shown, carbon losses during thermal spraying of chromium carbide are small and amount to 0.1-0.3% (by weight). During the thermal spraying of chromium carbides, a plastic component – bond – is also introduced into the coating composition. The most fully investigated the introduction of ligaments due to cladding of powder particles of Nickel. Mass fraction of nickel in the coating is 25-30%. A decrease in carbon oxidation due to the shielding effect of the cladding shell was experimentally confirmed. An active interaction of molten carbide with nickel is observed. It is known that nickel is practically insoluble

in Cr_3C_2 . In the process of sputtering, Cr_3C_2 turns into Cr_7C_3 . The latter is saturated with nickel, forming double carbide $(\text{CrNi})_7\text{C}_3$. [3-6]. And so on the basis of the foregoing, we can conclude the addition of tungsten carbide, a self-fluxing powder based on austenitic steels and nickel aluminum to chromium carbide, which has high heat resistance, resistance to aggressive media, high hardness at elevated temperatures, and carbide protection from oxidation during deposition, by creating a nickel protective film, it will significantly improve the properties of the resulting wear-resistant coating.

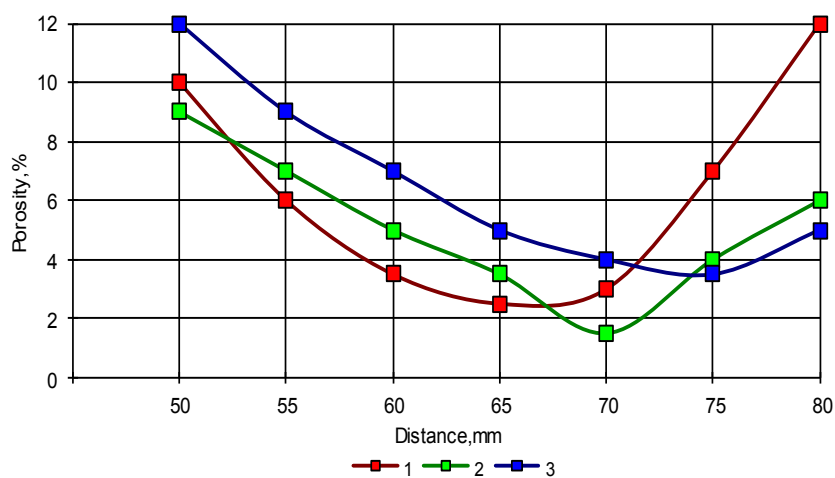
Formation of a coating from a mixture of clad tungsten and chromium carbides, a self-fluxing powder based on austenitic steel and nickel-aluminum. Coatings from a mixture of clad tungsten and chromium carbides, self-fluxing powder based on austenitic steel and nickel-aluminum were applied using a UPU-3D plasma system. The characteristics of the initial powders are given in table 1. The parameters of the plasma spraying are current 400 A, the spraying distance is 100 mm, the plasma flow rate of nitrogen gas is 55 l / min, the fraction is 50-100 microns, powder consumption 4.5 kg / h, thickness 350 microns. Reflowing was carried out in the same installation under the following conditions: current-450 A, reflow distance - 65-80 mm, plasma-forming nitrogen gas flow for - 65 l / min, travel speed 108 mm / min, number of passes-3. [10-12]. The percentage of powders in the mixture was selected on the basis of experiments (table 2). The influence of the deposition distance on the operational characteristics of plasma wear-resistant coatings obtained at optimal spraying and surfacing conditions is shown in Fig. 1 (a-c). Porosity studies were performed on an Epiguant automated structural analyzer. The hardness of the coatings was measured by the Rockwell method on a TK2M instrument on a "C" scale in accordance with the requirements of GOST 20017-74. Tests for friction and wear were carried out on a special stand according to the scheme: blocks coated with nitrided steel (St45). Tribotechnical tests were carried out in the absence of a lubricant at a load in the friction pair of 5 MPa for 10 hours, simulating the operating conditions of the wearing parts of internal combustion engines. Test conditions (gas 1% SO_2 -76% O_2 - N_2 ; Na_2SO_4 -3.6% salt PbSo_4 -5mg cm^{-2} , $T = 850\text{C}^\circ$) corresponded to the most unfavorable operating parameters of engines of autotractor equipment in dry friction conditions. The data of the friction and wear parameters of the coatings from the powders obtained by the prototype and the claimed invention are given in table 3. Analyzing the test results shown in table 3, we select the following percentage in the powder mixture - tungsten carbide powder plated with nickel (15 wt.%), Chromium carbide powder plated with nickel (20 wt.%), Self-fluxing powder based on austenitic steels class ПП – X18H9; ПП – X18H10; ПП – X18H15 (35 wt.%), Nickel-aluminum powder (30 wt.%). At this percentage, the characteristics of the obtained wear-resistant coatings correspond or exceed the analogue.

Table 1. Hardness, density and particle size distribution of powders

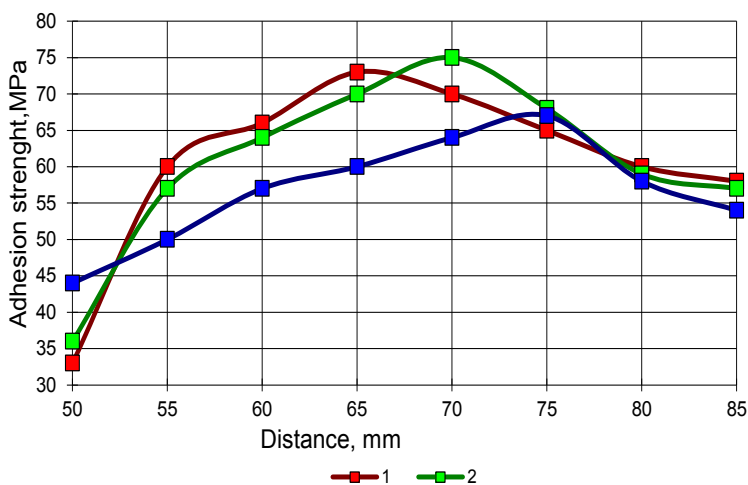
Powder grade	Hardness, HRC	Bulk density, g / cm^3	Granulometric composition, microns
Tungsten carbide	60-65	15,77	10-50
Chromium carbide	52-59	6,70	10-50
ПП-X18H15	32-38	3,48	45-100
Nickel-aluminum	26-30	2,79	10-50



a



b



c

Figure 1 - Dependence of hardness (HRC) (a), porosity (%) (b) and adhesion strength (MPa) (c) on deposition distance L, mm for powders 1IP – X18H15 - (WC-Ni) - (Cr₂C₃-Ni) - NiAl (1-30 1IP – X18H15 - 15 WC-30NiAl -25Cr₂C₃; 2-35 1IP– X18H15 - 15 WC-30NiAl-20Cr₂C₃; 3 -45 1IP – X18H15 - 15 WC-30NiAl-10Cr₂C₃; fraction 40 .. .63 μm, I = 450 A, RN = 65 l/ min, travel speed 108 mm / min, number of passes-3)

Table 2. Results of a study to optimize nickel cladding

Powder composition	The thickness of the shells of Ni on the powder particles, microns (τ -cladding time in hours)					
	$\tau = 3$	$\tau = 5$	$\tau = 7$	$\tau = 8$	$\tau = 10$	$\tau = 12$
35 ПП–X18H15 - 15 WC-30NiAl-20Cr ₂ C ₃	1,7	2,5	3,5	4,3	5,3	6,4

Note - The table provides averaged data on the thickness of nickel shells.

Table 3. Test results of powder compositions for thermal spraying

The composition of the mixture, mass% %	Hardness HRC	Porosity, %	Adhesion, MPa	Dry friction according to St 45 (gas test conditions 1% SO ₂ -76% O ₂ -N ₂ ; Na ₂ SO ₄ -3.6% salt PbSO ₄ -5 mg cm ⁻² , T = 850C°)	
				Wear coating, μ m	Load badass, kg
40 ПП–X18H15 - 30 WC-30NiAl(прототип)	53-58	2,5	64-66	6,9	8,6
45 ПП–X18H15 – 15(WC-Ni)-30NiAl -10(Cr ₂ C ₃ -Ni)	50-52	3,0	67-72	6,4	10,0
40 ПП–X18H15 – 15(WC-Ni)-30NiAl -15(Cr ₂ C ₃ -Ni)	54-59	2,0	69-74	5,0	10,2
35 ПП–X18H15 – 15(WC-Ni)-30NiAl -20(Cr ₂ C ₃ -Ni)	56-60	2,5	69-76	4,9	10,7
30 ПП–X18H15 – 15(WC-Ni)-30NiAl -25(Cr ₂ C ₃ -Ni)	57-62	3,5	63-67	5,9	9,5

The deposition of a thin-film shell of metal on WC and Cr₂C₃ powder particles was a chemical nickel plating. When performing the main operation, a solution of the following composition was used: nickel chloride - 28 g / l; sodium hypo-phosphite - 30 g / l; sodium citrate - 10 g / l; acetic acid - 10 ml / l. The temperature of the solution was maintained in the range 363–368 K, and the pH was 9.0–9.5. To obtain a uniform coating of particles, the solution with the powder in the bath was forcedly mixed. The duration of the nickel plating process (τ) was optimized for the formation of Ni shells 15–17 μ m thick on particles. The results of the study on optimizing the duration of the process are presented in table 2. As can be seen from table 2, the optimal nickel duration is 10-12 hours. During this time, a thin-film shell of Ni with a thickness of ~ 15-17 μ m is formed on the particles, which is necessary and sufficient according to the accepted criterion for optimizing the cladding of powders for plasma spraying of coatings. The mass content of Ni - P in the form of a cladding shell is about 32 - 39%.

Conclusions. As can be seen from the conducted studies, coatings obtained from powders 45 ПП – X18H15–15 (WC-Ni) -30NiAl-10 (Cr₂C₃-Ni) made according to the proposed method [14] have 1.4 times higher wear resistance with dry friction on steel than the coating obtained

from the powder, ПП – X18H15 - WC-, made according to the analogue [13], the porosity is 1.25 times lower, the adhesion strength is 1.2 times higher. Thus, the proposed method allows to increase the wear resistance of coatings in adverse friction conditions (boundary lubrication or lack of lubricant, increased temperature effects) and improve the technological characteristics of the coating.

REFERENCES:

1. Paramets optimization for plasma spraying and pulsed plasma treatment of surface layers of gas-thermal composite coatings based on multifunctional oxide ceramics / V.A. Okovity [et al.] // *High Temperature Material Processes*/ – 2014. – No. 18, – P. 45-62.
2. Okovity, V.A. Optimization of the process of spraying wear-resistant coatings based on multifunctional oxide ceramics / V.A. Okovity, A.F. Panteleenko // *Processing of metals*. - Novosibirsk, 2015. – No. 67. – P. 46-54.
3. Okovity, V.A. Technological features of the formation of plasma powder coatings from ceramics with a nonequilibrium structure / V.A. Okovity [et al.] // *Science and Technology BNTU*. – Minsk. – 2018. Issue 3. – P. 183-189.
4. Theory and practice of applying protective coatings / P.A. Vityaz [et al.] – Minsk, 1998.
5. Vit-yaz, P.A. Basics of application of wear-resistant, corrosion-resistant and heat-protective coat-ings / P.A. Vityaz, A.F. Ilyuschenko, A. I. Shevtsov. – Minsk, 2006. – P. 205-243, 280-300, 314-351.
6. Ilyuschenko, A.F. Plasma coatings based on ceramic materials / A.F. Ilyuschenko, V.A. Okovity, A.I. Shevtsov // *Besprint*. – Minsk, 2006. – 316 p.
7. Obtaining composite ceramic material for thermal spraying / V.A. Shackled [et al.] // *Science and Technology, BNTU*. – Minsk. – 2017. Issue. 3. – S.193-199.
8. Analysis and selection of possible options for spraying composite multilayer coatings from ceramic powders on protective screens / F. I. Panteleenko [et al.] // *Fundamental and applied problems of engineering and technology*. – 2019. – No. 4-2 (336). – P. 166-171.
9. Analysis and selection of possible options for spraying composite multilayer coatings of ceramic powders on protective screens / F.I. Panteleenko [et al.] // *Dynamics, reliability and durability of mechanical and biomechanical systems: abstracts of an international scientific and technical conference*. – 2019. – Moscow. – P.42-45.
10. Formation of plasma powder coatings from ceramics followed by high-energy modification to improve surface performance / F.I. Panteleenko [et al.] // *Welding in Russia - 2019. Current status and prospects: abstracts of the international conference, Tomsk, September 3-7. 2019 / Tomsk Polytechnic. institute; Ed.: Yu.N. Saraev*. – Tomsk, 2019. – 198p.
11. The method of applying a thermal coating: US Pat. EAPO 031995 / V.A. Bound, F.I. Panteleenko, V.V. Shackled, V.M. Astashinsky. – Publ. 03/29/2019.
12. Method of applying a wear-resistant coating: US Pat. EAPO 031920 / V.A. Bound, F.I. Panteleenko, V.V. Shackled, V.M. Astashinsky. - Publ. 03/29/2019.13 RB patent No. 19111 B22F 1/00, C 23C 4 / 04.14. A method of obtaining a ceramic powder: US Pat. EAPO 033694 / B.A. Bound, F.I. Panteleenko, V.V. Okovite, V.M. Astashinsky. - Publish. 11/18/19.

Received by the editors 25.03.2020

СОДЕРЖАНИЕ

Арефьев Е.М., Матвиенко С. А. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОСНОВНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК БАШЕННОГО КРАНА НА СРЕДНЕВЗВЕШЕННУЮ ДЛИТЕЛЬНОСТЬ ЦИКЛА ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ГРУЗА.....	3
Белоцерковский М.А., Белявин К.Е., Сосновский И.А., Курилёнок А.А. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СХЕМЫ И УНИВЕРСАЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ЦЕНТРОБЕЖНОГО ИНДУКЦИОННОГО ФОРМОВАНИЯ ПОРОШКОВЫХ ПОКРЫТИЙ.....	12
Михайлов А.Н., Котляров Б.С., Котляров В.Б., Котляров С.Б. ПРОЯВЛЕНИЕ АТРИБУТОВ ДЕТАЛЕЙ МАШИН КАК ФАКТОРОВ РАЗРАБОТКИ ФУНКЦИОНАЛЬНО-ОРИЕНТИРОВАННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ....	22
Михайлов Д. А., Шейко Е. А., Михайлов В. А., Михайлов А. Н. ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ МНОГОСЛОЙНЫХ ФУНКЦИОНАЛЬНО-ОРИЕНТИРОВАННЫХ ПОКРЫТИЙ ЛОПАТОК ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ.....	34
Ракунов Ю. П., Абрамов В. В., Ракунов А. Ю. ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ ПРИНЦИПЫ РАЗРАБОТКИ И РЕАЛИЗАЦИИ СИСТЕМЫ МНОГОУРОВНЕВОЙ БАЗОВОЙ ГРУППОВОЙ ТЕХНОЛОГИИ.....	45
Стрельник Ю. Н., Михайлов Д. А., Матвиенко С. А., Лукичев А. В., Михайлов А. Н. МЕТОДИКА НАНЕСЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНО-ОРИЕНТИРОВАННОГО ПОКРЫТИЯ НА ШАРОВЫЙ ПАЛЕЦ НАКОНЕЧНИКА РУЛЕВОЙ ТЯГИ АВТОБУСА.....	57
Яковченко А.В., Пилипенко В.В. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СИЛЫ ПРИ НЕСТАЦИОНАРНОМ ПРОЦЕССЕ ПРОКАТКИ ФЛАНЦА С НАРУЖНЫМ ГРЕБНЕМ НА КОЛЬЦЕПРОКАТНОМ СТАНЕ.....	65
Panteleenko F.I., Okovity V.A., Devoino O.G., Volodko A.S., Panteleenko A.F. FORMING COATINGS FROM SELF-FLUXING POWDER BASED ON STEELS OF AUSTENITE CLASS CADDING CERAMICS.....	70

ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ

Devoino O. G.	70
Okovity V. A.	70
Panteleenko A. F.	70
Panteleenko F. I.	70
Volodko A. S.	70
Абрамов В. В.	45
Арефьев Е. М.	3
Белоцерковский М. А.	22
Белявин К. Е.	22
Котляров Б. С.	22
Котляров В. Б.	22
Котляров С. Б.	22
Курилёнок А. А.	12
Лукичев А. В.	57
Матвиенко С. А.	3, 57
Михайлов А. Н.	22, 34, 57
Михайлов В. А.	34
Михайлов Д. А.	34, 57
Пилипенко В. В.	65
Ракунов А. Ю.	45
Ракунов Ю. П.	45
Сосновский И. А.	22
Стрельник Ю. Н.	57
Шейко Е. А.	34
Яковченко А. В.	65

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 или mntk21@mail.ru .

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ

1. Текст статьи выполняется объемом от 5 до 10 страниц (**обязательно полные страницы**), формат А4 (210x297 мм) с полями: верхнее и нижнее – 30 мм, а левое и правое - 25 мм. Страницы не нумеровать. Статьи оформить с применением редактора WinWord (не ниже версии 6,0) шрифтом Times New Roman, выполненным в соответствии с образцом оформления, межстрочный интервал - 1,0, шрифт – 12pt. Материалы представить в электронном виде.

2. Порядок оформления. Материалы должны отвечать следующей структурной схеме: УДК, инициалы и фамилии авторов, ученая степень и звание (сокращение по ГОСТ 7.11 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 или mntk21@mail.ru

<http://ptsm.donntu.ru>

- **Публикация статей в международном сборнике научных трудов «Прогрессивные технологии и системы машиностроения» - выполняется бесплатно**

Образец оформления материалов
УДК 621.85.05-034(12 pt)

И. И. Иванов, д-р техн. наук, проф., **П. П. Петренко**, ассист. (12 pt)
Донецкий национальный технический университет, ДНР (12 pt)
Брянский государственный технический университет, Россия (12 pt)
Тел./Факс: +38 (062) 3050104; E-mail: 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 3 (70)' 2020

Главный редактор
д-р техн. наук, проф. А.Н. Михайлов
E-mail: 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

Сайт: <http://ptsm.donntu.org>

Сборник (Е) зарегистрирован в Министерстве информации Донецкой Народной Республики.