

УДК 621.793

## ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ КЛАССИФИКАТОР ДЕТАЛЕЙ И ПОВЕРХНОСТЕЙ С ГАЗОТЕРМИЧЕСКИМИ ПОКРЫТИЯМИ

Харламов Ю.А.

## TECHNOLOGICAL CLASSIFICATION OF THERMAL SPRAYED PARTS AND SURFACES

Kharlamov Y.A.

*В статье предложен технологический классификатор изделий машиностроения и их поверхностей с покрытиями, полученными методами газотермического напыления. Технологический классификатор состоит из трех частей: базовой, кодирующей основную информацию о напыляемом изделии; технологической, кодирующей основную информацию о детали и ее напыляемых поверхностях и технологической, кодирующей информацию о газотермическом покрытии. Показаны перспективы применения классификатора при разработке систем автоматизированного проектирования технологических процессов производства деталей с газотермическими покрытиями.*

**Ключевые слова:** газотермическое напыление, кодирование, маршрутная технология, поверхность, покрытие.

**Введение.** Для обеспечения конкурентоспособности продукции машиностроения Украины необходимо осваивать технологии получения поверхностей деталей машин, стойких к износу, коррозии и старению, придание и сохранение ими трибологических, электрических, оптических, термических и иных функциональных свойств в течение длительного периода. Технологии поверхностной обработки и осаждения покрытий являются составляющими крупного научно-технического направления «инженерия поверхности» [1 – 5]. Среди большого разнообразия методов нанесения покрытий и модификации поверхности – химических, электрохимических (гальванических), химико-термических (цементация, азотирование, цианирование и т.д.), физических (лазерная и электроннолучевая порошковая наплавка) особое место занимают методы газотермического

напыления — газопламенной, электродуговой, плазменной, детонационной и др. Большой научный и практический интерес к этим методам обусловлен их широкими возможностями как по виду напыляемых веществ, созданию гомогенных и гетерогенных материалов покрытий, так и возможности обработки изделий различного типоразмера и геометрии [6 – 9]. Этим обусловлено проведение широкого фронта фундаментальных и прикладных исследований данных процессов [6, 9 – 11], а также разработка новых разновидностей процессов, вплоть до разработки принципиально новых, как холодное газодинамическое напыление [12 – 15].

Разработка громадного количества конструкторских и технологических решений в сфере производства и применения газотермических покрытий, а также успехи в совершенствовании и автоматизации соответствующих технологических операций способствовали резкому расширению рынка газотермического напыления, особенно в индустриально развитых странах, однако существенно затрудняют выбор и проектирование рациональных технологических процессов. Это увеличивает длительность технологической подготовки производства изделий с газотермическими покрытиями, а также ограничивает расширение областей и объемов их применения.

Целью работы является разработка системы классификации, кодирования и унификации конструктивных и технологических элементов деталей с газотермическими покрытиями, что является актуальной задачей при создании систем автоматизированного проектирования

технологических процессов получения газотермических покрытий и производства деталей с покрытиями.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Процессы получения газотермических покрытий можно условно разделить на три этапа: 1. подготовка поверхности к напылению; 2. напыление покрытия; и 3. обработка напыленного покрытия. Этот подход и используется в известных публикациях по газотермическому напылению [16-20]. На первых стадиях развития и внедрения технологий получения газотермических покрытий преимущественное внимание уделяли совершенствованию и разработке новых отдельных технологических операций: подготовке поверхности, нанесению покрытия и его последующей при необходимости обработке [21-23]. В последние годы большое внимание уделяется моделированию, диагностике и мониторингу процессов газотермического напыления [10, 11, 24], а также совершенствованию конструкций покрытий. В известных работах не рассматриваются вопросы взаимосвязи технологии получения газотермических покрытий и общей маршрутной технологии производства изделий с покрытиями. Решение этой проблемы возможно на основе использования автоматизированных систем проектирования.

**Материалы и результаты исследования.** Автоматизация подготовки производства должна включать в себя классификацию, кодирование и унификацию конструктивных и технологических элементов деталей, оборудования, приспособлений и инструментов для их производства и контроля. Детали машиностроительного назначения с газотермическими покрытиями (ГТП) имеют широкое разнообразие конструктивно и технологически сложных поверхностей, формообразование которых, включая получение ГТП с требуемыми свойствами, требует длительной и трудоемкой технологической подготовки.

Конструктивно и технологически сложные поверхности имеют ряд общих количественных и качественных характеристик, связанных с их образованием, модифицированием и обработкой. Поэтому систематизация и классификация как деталей, так и обрабатываемых поверхностей по способу образования и по способу обработки, включая получение покрытий, является шагом на пути типизации технологических процессов изготовления и восстановления утраченной работоспособности деталей машин.

При подразделении деталей и поверхностей с газотермическими покрытиями (ГТП) на группы и подгруппы следует учитывать следующие возможные варианты осуществления технологического процесса получения ГТП:

- 1) в условиях специализированного серийного производства ГТП;
- 2) в условиях поточного производства деталей с ГТП;

- 3) в гибких производственных системах, имеющих рабочие места и участки газотермического напыления.

Исходя из особенностей образования конструктивных форм поверхностей деталей можно выделить следующие группы ГТП:

- 1) ГТП на поверхностях, образованных обработкой заготовок для создания новых деталей машин, без размерной обработки покрытий;
- 2) ГТП на поверхностях, образованных обработкой заготовок для создания новых деталей машин, с окончательной размерной обработкой покрытий;
- 3) ГТП на поверхностях деталей, обработанных под ремонтные размеры, затем восстановленных методами газотермического напыления, без размерной обработки покрытий;
- 4) ГТП на поверхностях деталей, обработанных под ремонтные размеры, затем восстановленных методами газотермического напыления, с окончательной размерной обработкой покрытий;
- 5) ГТП, непосредственно формообразующие деталь (изделие) или некоторые его объемные части.

Анализу и последующей классификации подлежат как широко распространенные виды и типы деталей в машиностроении, так и специальные, характерные для отдельных отраслей и конструкций, изготавливаемые из разнообразных материалов и сплавов. Каждому классу деталей присваивается индивидуальный код (буквой латинского алфавита) (табл. 1). Для этих целей допускается использование общемашиностроительных и отраслевых классификаторов деталей, существующих или адаптированных для конкретных условий производства.

Таблица 1

**Технологический классификатор напыляемых деталей**

<i>Класс деталей</i>	<i>Код детали</i>
Валы, оси	А
Втулки	В
Шкивы	С
Гильзы	Д
Шестерни	Е
Муфты	F
Фланцы	G
Клапаны	Н
Корпусные	І
Прочие	J

Технологический классификатор деталей с ГТП состоит из трех частей: базовой, технологической детали и технологической поверхности с покрытием.

Первая (базовая) часть включает описание конструктивных особенностей напыляемых поверхностей рассматриваемого класса деталей, начиная от гладких поверхностей простой формы до усложнения до фасонных, содержащие разнообразные конструктивные элементы и их

сочетания, влияющие на обрабатываемость как при получении поверхностей, например, обработкой резанием, так и при их подготовке к напылению, а также на удобство напыления и последующую обработку напыленного покрытия (табл. 2 и 3). Эти данные используются как при разработке общей маршрутной технологии изготовления изделия с покрытием, так и его части, относящейся к получению и обработке покрытия, а также анализа технологичности конструкции изделия с покрытием.

Вторая часть содержит описание конструктивно-технологических признаков, непосредственно относящихся к обрабатываемым поверхностям детали, их степени точности, шероховатости; отклонениям формы и расположения поверхностей; материалу детали; термической обработке детали; размерной характеристике детали; в том числе сведения о количественных и качественных характеристиках напыляемых поверхностей детали, включая исходное состояние напыляемой поверхности. Эта информация необходима для проектирования маршрутной и операционной технологии.

Таблица 2

**Кодирование напыляемых поверхностей**

<i>Тип напыляемой поверхности</i>	<i>Код</i>
Плоская наружная	0
Плоская внутренняя	1
Цилиндрическая наружная	2
Цилиндрическая внутренняя	3
Коническая наружная	4
Коническая внутренняя	5
Сферическая наружная	6
Сферическая внутренняя	7
Фасонная наружная	8
Фасонная внутренняя	9

Таблица 3

**Кодирование конструктивных элементов напыляемых поверхностей**

<i>Тип конструктивного элемента</i>	<i>Код</i>
Без конструктивных элементов	0
Пазы	1
Отверстия	2
Лыски	3
Резьба	4
Зубья	5
Шлицы	6
Прочие	7

В третьей части приводят информацию, непосредственно относящуюся к газотермическому покрытию: функциональное назначение и материал покрытия; его толщина и требования к ее точности; структура и конструктивные особенности покрытия; пористость и прочность сцепления; при необходимости – способы подготовки поверхности и напыления покрытия.

Структура технологического классификатора приведена в табл. 4. Детали присваивается

персональный код прописной буквой латинского алфавита в соответствии с перечнем деталей из табл. 1.

Таблица 4

**Структура технологического классификатора**

<i>Позиция технологического классификатора</i>	<i>Кодируемые параметры</i>
1	Код детали
2	Код напыляемой поверхности
3	Коды конструктивных элементов поверхности
4	
5	
6	Размерная характеристика детали
7	
8	
9	Исходное состояние поверхности
10	Наивысший квалитет точности размеров внутренних поверхностей детали
11	Наивысший квалитет точности размеров наружных поверхностей детали
12	Параметр наименьшей шероховатости для обрабатываемых поверхностей детали
13	Наличие у детали требований отклонения формы и расположения поверхностей
14	Материал детали
15	Термическая обработка
16	Масса детали
17	Функциональное назначение покрытия
18	Материал покрытия
19	Способ подготовки поверхности к напылению
20	Структура покрытия
21	Конструкция покрытия
22	Толщина покрытия
23	Квалитет точности по толщине
24	Пористость покрытия
25	Прочность сцепления
26	Способ напыления
27	Способ после-напылительной обработки покрытия
28	Параметр шероховатости поверхности с покрытием

Кодирование напыляемой поверхности (поз. 2) выполняется в соответствии с ее геометрической формой и ее расположением в детали (наружная или внутренняя). Эта информация необходима для оценки доступности для выполнения операций получения газотермического покрытия (ГТП) и выбора напылительного пистолета, метода и инструментов для подготовки поверхности и обработки покрытия.

Наличие на напыляемой поверхности специальных конструктивных элементов кодируется трехзначным кодом (поз. 3, 4 и 5) по данным табл. 3 в соответствии с конструктивными особенностями

детали. Использование трехзначного кода предусмотрено для случаев наличия на поверхности нескольких видов конструктивных элементов, при этом коды соответствующих элементов располагаются в порядке уменьшения трудоемкости и сложности выполнения подготовительных и напылительных операций.

Кодирование детали по размерной характеристике выполняется тремя разрядами (поз. 6, 7 и 8), например, для деталей типа тел вращения по данным табл. 5.

Таблица 5

**Данные для кодирования размерных характеристик деталей – тел вращения**

Код (поз.6)	Наибольший наружный диаметр, мм	Код (поз.7)	Длина, мм
0	до 20	0	до 10
1	20...40	1	10...25
2	40...70	2	25...50
3	70...100	3	50...100
4	100...200	4	100...200
5	200...500	5	200...350
6	500...1000	6	350...500
7	1000...1500	7	500...750
8	1500...2500	8	750...1200
9	св. 2500	9	св. 1200
Код поз.8	Диаметр центрального отверстия, мм		
0	Без		
1	до 10		
2	10...20		
3	20...50		
4	50...100		
5	100...200		
6	200...400		
7	400...500		
8	500...600		
9	св. 600		

Таблица 6

**Данные для кодирования детали по исходному состоянию напыляемой поверхности**

Код	Вид обрабатываемой поверхности
0	Получена литьем
1	Получена обработкой давлением
2	После обработки резанием
3	Изношенная при эксплуатации
4	С элементами выкрошивания при эксплуатации
5	С рисками, надирами и задирами в результате эксплуатации
6	Корродированная при эксплуатации
7	С восстановительным газотермическим покрытием
8	С восстановительным наплавленным покрытием
9	Прочие

Например, у цилиндрических деталей первым разрядом (поз. 6) кодируется наибольший наружный диаметр; вторым разрядом (поз. 7) – длина детали; третьим разрядом (поз.8) кодируется диаметр центрального отверстия. При кодировании

центрального отверстия учитывается только диаметр отверстия независимо от наличия шпоночных и иных пазов или шлицев. В ступенчатом центральном отверстии (не подвергаемом напылению) кодируется диаметр ступени с наивысшим качеством точности, а при равной точности двух или более ступеней – размер отверстия большего диаметра. В коническом отверстии кодируется размер меньшего диаметра конуса.

Кодирование детали по исходному состоянию напыляемых поверхностей выполняется одной цифрой (поз. 9) по данным табл. 6. Эта информация необходима для разработки операционной технологии подготовки поверхности и выбора параметров покрытия.

Кодирование размеров детали по качеству точности выполняется двузначным кодом (поз. 10 и 11). Позиция 10 обозначает наивысший качество точности размеров внутренних поверхностей детали, а позиция 11 обозначает наивысший качество точности размеров наружных поверхностей (табл. 7).

Таблица 7

**Кодирование качества точности размеров детали**

Код	Квалитет
0	17; 16; 15; 14
1	13; 12
2	11; 10; 9
3	8; 7; 6; 5

Позиция 12 предусмотрена для кодирования параметра наименьшей шероховатости для обрабатываемых поверхностей детали, а позиция 13 - наличие у детали требований отклонения формы и расположения поверхностей. Эти данные необходимы при разработке маршрутной технологии изготовления детали для выбора рационального размещения операций и переходов получения газотермических покрытий в общем маршруте.

Материал детали кодируется одной цифрой (поз. 14, табл. 8). Позиция 15 предусмотрена для кодирования термической обработки детали и места ее выполнения в общем маршруте изготовления детали, а позиция 16 для кодирования массы детали.

Таблица 8

**Кодирование материала детали**

Код	Материал детали
0	Сталь углеродистая
1	Сталь легированная
2	Чугун
3	Сплав алюминия
4	Сплав меди
5	Сплав титана
6	Сплавы тугоплавких металлов
7	Керамика
8	Композиционный материал
9	Прочие

С позиции 17 начинается кодирование характеристик, относящихся непосредственно к покрытию. Функциональное назначение покрытия кодируется одной цифрой (поз. 17, табл. 9) и используется для анализа технологичности конструкции детали и покрытия. Выбор (проектирование) ГТП необходимо проводить из требований обеспечения заданных функциональных характеристик покрытия: адгезионной и когезионной прочности; микро- и макропористости; микро-, мезо-, макроструктуры и фазового состава; внутренних границ раздела (межфазных и структурные); остаточных напряжений в покрытии, основе и на их границе раздела; свойств напыленного покрытия. При этом требование одновременного удовлетворения покрытием нескольким из перечисленных характеристик может существенно ограничить использование тех или иных методов ГТН и оборудования.

Таблица 9

**Кодирование функционального назначения покрытия**

Код	Функциональное назначение покрытия
0	Триботехническое
1	Коррозионностойкое
2	Декоративное
3	Восстановительное
4	Технологическое
5	Формообразующее
6	Теплозащитное
7	Со специальными физическими свойствами
8	Многофункциональное
9	Прочие

Большинство других функциональных характеристик покрытия (твердость и микротвердость, газопроницаемость, электропроводность, теплопроводность, термостабильность и др.) являются производными от перечисленных выше, а также в той или иной степени наследуют свойства исходных материалов (порошка и основы). Большую роль играют также свойства основы и ее поверхности перед напылением, а также характеристики газовой среды, в которой ведется напыление.

Основные характеристики покрытия в первом приближении можно представить зависящими от множества следующих параметров

$$\left\{ \begin{array}{l} \bar{d}_p \pm t_1 \sigma_{\bar{d}_p}; \bar{G}(d_p) \pm t_2 \sigma_{\bar{G}(d_p)}; \bar{w}_{p_0} \pm t_3 \sigma_{\bar{w}_{p_0}}; \\ A_{p_0}; \bar{T}_{p_0} \pm t_4 \sigma_{\bar{T}_{p_0}}; \\ \bar{T}_{b_0} \pm t_5 \sigma_{\bar{T}_{b_0}}; \bar{Env}_i \pm t_6 \sigma_{\bar{Env}_i}; \bar{SL}_j \pm t_7 \sigma_{\bar{SL}_j}; \\ \bar{GSP}_k \pm t_8 \sigma_{\bar{GSP}_k}; \bar{Dm}_l \pm t_9 \sigma_{\bar{Dm}_l} \end{array} \right\}$$

где средние статистические значения:  $\bar{d}_p$  – диаметра частиц;  $\bar{G}(d_p)$  – расхода напыляемого

материала в напылительной струе;  $\bar{w}_{p_0}$  – скорости частиц;  $\bar{T}_{p_0}$  – температуры частиц перед соударением;  $\bar{T}_{b_0}$  – температуры основы;  $\bar{Env}_i$  – состава и параметров состояния рабочей среды;  $\bar{SL}_j$  – параметры структуры и свойств поверхностного слоя детали;  $\bar{GSP}_k$  – характеристики шероховатости напыляемой поверхности и геометрии детали;  $\bar{Dm}_l$  – размеры поперечного сечения напылительной струи.

В первом приближении основные характеристики покрытия определяются пространственно-временными распределениями расхода  $G(D_p, r, t)$  частиц заданного размера и его среднеквадратическим отклонением  $\sigma_{G(D_p, r, t)}$ , распределениями осредненных значений ключевых физических параметров (КФП): скорости  $u_{p_0}$ , размера  $D_p$ , агрегатного состояния  $A_{p_0}$  и температуры  $T_{p_0}$  частиц перед соударением, температуры  $T_{b_0}$  основы, характеристик шероховатости ее поверхности  $Ra, Rz, Rmax$ , а также среднеквадратическими отклонениями перечисленных выше параметров по сечению пятна напыления  $r \leq R_{slot}$  (полагая, что пятно осесимметрично, а агрегатное состояние частиц может быть однозначно восстановлено по температуре их поверхности).

Материал покрытия кодируется одной цифрой (поз. 18, табл. 10). Классификация покрытий по виду исходного материала является важной для анализа технологичности конструкции детали и правильность выбора способа ГТН и технологии его обработки. Она не учитывает форму исходного материала (порошок, проволока, стержень, порошковая проволока, гибкий шнур и пр.), а его состав, прежде всего определяющий свойства покрытия. Эта информация позволяет прогнозировать свойства газотермических покрытий, когда отсутствуют предварительные проработки по технологии и соответствующие экспериментальные исследования.

Таблица 10

**Кодирование материала покрытия**

Код	Материал покрытия
0	Металл
1	Сплав
2	Интерметаллид
3	Полимер
4	Тугоплавкое соединение
5	Оксид
6	Полимер
7	Композиционное на металлической матрице
8	Наноматериал
9	Прочие

Способ специальной обработки поверхности перед напылением покрытия кодируется одной цифрой (поз. 19, табл. 11). Выбранный способ подготовки поверхности к напылению в значительной мере определяет прочность сцепления с основным материалом, а также усталостную прочность деталей с покрытиями, подвергаемыми при эксплуатации циклическому нагружению. Специальная механическая обработка включает такие методы подготовки поверхности, как нарезание рваной резьбы, нарезание кольцевых канавок, накатка или насечка. К прочим методам подготовки поверхности можно отнести электроискровую обработку, ионно-дуговую активацию, ультразвуковую обработку, вибрационную обработку и др.

Таблица 11

**Кодирование способа специальной обработки перед напылением покрытия**

<i>Код</i>	<i>Способ предварительной обработки поверхности</i>
0	Специальная механическая обработка
1	Струйно-абразивная обработка
2	Обработка высокоскоростной струей воды
3	Иглофрезерование
4	Травление
5	Лазерная обработка
6	Нанесение подслоя негизотермическими методами
7	Комбинированный способ
8	Изоляция поверхностей, не подлежащих напылению
9	Прочие

Таблица 12

**Кодирование вида преобладающей структуры покрытия**

<i>Код</i>	<i>Вид преобладающей структуры покрытия</i>
0	Кристаллическая
1	Аморфная
2	Аморфно-кристаллическая
3	Квазикристаллическая
4	Псевдосплавная
5	Гетерофазная
6	Наноструктура
7	Наноструктурированная
8	Кластерная
9	Прочие

Кодирование вида преобладающей структуры напыленного покрытия осуществляется одной цифрой (поз. 20, табл. 12). Как известно, свойства газотермических, как и других видов покрытий, и материалов и деталей с покрытиями определяются комплексом характеристик структуры и физико-механических свойств. К ним относятся: параметры структуры покрытий, определяемые методами металлографии, электронной микроскопии, рентгеноструктурного анализа и др.; механические

свойства – модуль упругости, твердость, пластичность, когезионная прочность, усталостная прочность, микропластичность, контактная выносливость и др.; физические свойства – плотность, пористость, газопроницаемость, электропрочность, теплопроводность, термический коэффициент линейного расширения, оптические свойства и др.; параметры прочности сцепления в различных условиях; защитные свойства – жаростойкость, термическая усталость, коррозионная стойкость в различных средах, вязкость разрушения – параметры статической, циклической и динамической трещиностойкости; трибологические характеристики покрытий – коэффициенты трения и износостойкость при различных видах изнашивания – в парах трения, фреттинг-коррозии, гидроабразивного, ударно-абразивного, газоабразивного и пр.; и др., в том числе специфические параметры. Информация о структуре покрытия позволяет оценить правильность выбора технологии его получения и возможности достижения требуемого уровня его технических характеристик.

Конструктивные особенности покрытия кодируются одной цифрой (поз. 21, табл. 13). По мере развития технологии ГТН и областей их промышленного применения разработаны и продолжают развиваться разнообразные подходы к получению покрытий с различной макроструктурой и дополнительными конструктивными элементами покрытий, обеспечивающие существенное повышение их несущей способности.

Таблица 13

**Кодирование типа покрытия по конструктивным особенностям**

<i>Код</i>	<i>Тип покрытия</i>
0	Однослойное
1	С подслоем
2	Многослойное
3	Градиентное
4	Армированное
5	Свайное
6	Комбинированное
7	Пропитанное
8	Дискретное
9	Прочие

Кодирование покрытий по группам толщины выполняется одной цифрой (поз. 22, табл. 14). Необходимость классификации газотермических покрытий по толщине обусловлена тем, что диапазон толщин применяемых газотермических покрытий колеблется от десятков микрометров до нескольких миллиметров. Увеличение толщины покрытий существенно сказывается на условиях их формирования, структуре, величине внутренних напряжений и свойствах, а также требует изменения режимов напыления, а в ряде случаев их конструкции.

Таблиця 14

**Кодирование группы покрытия по толщине**

Код	Группа покрытия по толщине, мм
0	До 0,05
1	0,05...0,1
2	0,1...0,3
3	0,3...0,5
4	0,5...0,75
5	0,75...1,0
6	1,0...2,0
7	2,0...3,0
8	3,0...5,0
9	Св. 5,0

Кодирование качества точности толщины покрытия выполняется одной цифрой (поз. 23, табл. 15). Его применяют при существенном влиянии толщины покрытия на их эксплуатационные свойства, например, на задиристость, специальные физические свойства и пр.

Таблиця 15

**Кодирование качества точности толщины покрытия**

Код	Квалитет
0	Не нормируется
1	14...17
2	12...13
3	9...11
4	8
5	7
6	6
7	5

Кодирование покрытий по пористости выполняется одной цифрой (поз. 24, табл. 16). Необходимость классификации газотермических покрытий по пористости связана со значительным влиянием этого параметра на многие физические и эксплуатационные свойства, в т.ч. на коррозионную стойкость и проницаемость в различных средах. Условно можно выделить пять групп газотермических покрытий по пористости: 1) практически беспористые (до 1,0 %); 2) малопористые (1,0...2,0 %); 3) умеренно пористые (2,0...5,0 %); 4) пористые (5,0...10,0 %); 5) высокопористые (св. 10%).

Таблиця 16

**Кодирование покрытий по пористости**

Код	Пористость, %
0	До 1,0
1	1,0...2,0
2	2,0...5,0
3	5,0...10,0
4	10,0...15,0
5	15,0...20,0
6	20,0...30,0
7	Св. 30,0

Таблиця 17

**Кодирование покрытий по прочности сцепления**

Код	Прочность сцепления, МПа
0	До 10,0
1	10,0...20,0
2	20,0...30,0
3	30,0...40,0
4	40,0...50,0
5	50,0...60,0
6	60,0...70,0
7	Св. 70,0

Кодирование покрытий по прочности сцепления выполняется одной цифрой (поз. 25, табл. 17). Классификация покрытий по прочности сцепления связана с определенными трудностями в интерпретации результатов испытаний покрытий на прочность сцепления ввиду разнообразия используемых методик. Можно ориентироваться на прочность сцепления, измеряемую методом отрыва конического штифта от покрытия. По прочности сцепления покрытия подразделяются на следующие группы: 1) малонагруженные ( $\sigma_{сц} \leq 10$  МПа); 2) умереннонагруженные ( $10 < \sigma_{сц} \leq 30$  МПа); 3) средненагруженные ( $30 < \sigma_{сц} \leq 70$  МПа); 4) тяжело нагруженные ( $\sigma_{сц} > 70$  МПа).

Кодирование покрытий по способу напыления выполняется одной цифрой (поз. 26, табл. 18). Классификация покрытий по способу ГТН затруднений не вызывает. Необходимость такой классификации связана с тем, что покрытия, напыляемые из одного и того же материала, из одной и той же его партии разными способами, как правило, существенно отличаются по составу, структуре, свойствам, а также затратам. Трудность практической реализации контроля качества покрытий в ряде случаев обуславливает обязательную регламентацию применяемого способа ГТН в конкретных условиях. Однако при определенных требованиях к покрытию осуществляется выбор соответствующего способа напыления.

Таблиця 18

**Кодирование способов газотермического напыления покрытий**

Код	Способ газотермического напыления покрытий
0	Подлежит выбору
1	Газопламенное
2	Высокоскоростное газопламенное
3	Детонационно-газовое
4	Высокочастотное индукционное
5	Электродуговое
6	Плазменное
7	Холодное газодинамическое
8	Комбинированное
9	Прочие

Таблиця 19

**Кодирование способов после-напылительной обработки покрытий**

Код	Способ после-напылительной обработки покрытий
0	Без обработки
1	Термическая
2	Оплавление
3	Химико-термическая
4	Лазерная
5	Обработка лезвийным и абразивным инструментом
6	Пропитка и инфильтрация
7	Поверхностным пластическим деформированием
8	Комбинированная
9	Прочие

Кодирование способов после-напылительной обработки покрытий выполняется одной цифрой (поз. 27, табл. 19). Во многих случаях окончательные характеристики покрытия, определяющие его работоспособность, формируются на стадии его дополнительной обработки после напыления.

Кодирование параметра шероховатости напыленного покрытия после окончательной обработки выполняется одной цифрой (поз. 28, табл. 20). При отсутствии требований к шероховатости поверхности с покрытием в технологическом процессе отсутствует его размерная обработка.

Таблиця 20

**Кодирование параметра шероховатости напыленного покрытия после окончательной обработки**

Код	Параметры шероховатости обработанного покрытия	
	Ra, мкм	Rz, мкм
0	Не нормируется	
1	Св. 80	Св. 320
2	10...80	40...320
3	2,5...10	10...40
4	0,32...2,5	1,6...10
5	0,02...0,32	0,1...1,6

Задачей разработки маршрутной технологии изготовления детали с покрытием является поиск последовательности выполнения технологических операций и переходов, которая минимизирует затраты, не дающие экономического эффекта, например, удаление излишне напыленного материала, удаление защитных масок и экранов, установленных перед напылением. Причем положение процесса напыления в маршрутном процессе изготовления детали оказывает большое влияние на стоимость. Рассмотрим две последовательности этапов изготовления детали:

**Последовательность 1:** Заготовительные операции получения заготовки → Обработка резанием → Напыление покрытия

**Последовательность 2:** Заготовительные операции получения заготовки → Напыление покрытия → Обработка резанием

Легко установить, что последовательность 1 требует защиты обрабатываемых резанием поверхностей перед напылением, тогда как последовательность 2 требует лишь перегрузки обрабатываемой заготовки с покрытием. Нанесение защитных масок является операцией, не дающей экономического эффекта. Последовательность 1 имеет более высокую стоимость и меньшие производственные риски. Последовательность 2 исключает нанесение защитных масок, их удаление после напыления и удаление излишне напыленного материала. Это идеальный процесс с точки зрения о стоимости при использовании технологических приемов и средств, исключающих риски повреждения покрытия. Последовательность 2 имеет более высокие риски повреждения покрытия и возможно возникновение определенного производственного брака. Поэтому необходимо учитывать затраты на выполнение отдельных этапов технологического процесса и в целом по всему технологическому маршруту.

**Выводы.** В работе предложена система классификации деталей с газотермическими покрытиями, учитывающая конструктивные особенности и основные параметры как деталей, так и покрытий.

Практическое применение предлагаемой классификации позволяет:

1. систематизировать и обобщать конструкторско-технологическую информацию по газотермическому напылению и опыту его применения;
2. присваивать кодовые обозначения типовым напыляемым поверхностям для типизации технологических процессов получения покрытий и обработки заготовок с покрытиями, а также для последующей автоматизации технологического проектирования;
3. распределять детали по видам поверхностей и типам наносимых газотермических покрытий для разработки типовых и групповых технологических процессов;
4. создавать специализированные участки и гибкие производственные системы газотермического напыления.

**Л и т е р а т у р а**

1. Хокинг М. Металлические и керамические покрытия: Получение, свойства и применение / Хокинг М., Васантакри В., Сидки П. – М.: Мир, 2000. – 518 с.
2. Теория и практика нанесения защитных покрытий / Витязь П.А., Ивашко В.С., Ильющенко А.Ф. [и др.]. – Минск: Беларуская навука, 1998. – 583 с.
3. ASM Handbook Volume 5: Surface Engineering. – Ohio: ASM International, 1994 – P. 1056.



4. Cartier M. / 2003. Handbook of Surface Treatments and Coatings / Cartier M., Polak T.A., G D Wilcox G.D. – N-Y: ASME Press, 2003. – P. 412.
5. Ющенко К.А. Инженерія поверхні / К.А. Ющенко, Ю.С. Борисов, В.Д. Кузнецов, В.М. Корж. – Київ: Наук.думка. 2007. – 559 с.
6. Pawlowski L. The Science and Engineering of Thermal Spray Coatings: 2-nd Ed. / L. Pawlowski // Chichester, England. John Wiley & Sons, Ltd. – 2008. – P. 647.
7. Handbook of Thermal Spray Technology, edited by J.R. Davis // Ohio: ASM International. – 2004. – P. 347.
8. Tucker Jr., C. (Ed.), 2013. ASM Handbook. Thermal Spray Technology Volume 5A. - Ohio: ASM International. P. 412.
9. Кудинов В.В. Нанесение покрытий напылением. Теория, технология и оборудование / Кудинов В.В., Бобров Г.В. – М.: Metallurgiya, 1992. – 432 с.
10. Fauchais, P. Thermal Spray Fundamentals / Fauchais P., Heberlein J., Boulos M. N-Y: Springer, 2014. - P. 1600.
11. Достанко А.П. (ред.) Плазменные процессы в производстве изделий электронной техники. В 3-х т.; Под общ. ред. А.П. Достанко. Мн.: ФУАинформ. Том 1, 2000. – 424 с.; Том 2, 2001. – 244 с.; Том 3, 2001. – 292 с.
12. Алхимов А.П. Холодное газодинамическое напыление. Теория и практика / Алхимов А.П., Клинков С. В., Косарев В.Ф., Фомин В.М. Под ред. В.М. Фомина. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010. — 536 с.
13. Villafuerte J. (Ed.) Modern Cold Spray: Materials, Process, and Applications / Villafuerte J. (Ed.). - Cham, Switzerland: Springer International Publishing, 2015. – P.435.
14. Champagne Victor K. (ed.). The cold spray materials deposition process. Fundamentals and applications / Ed. Victor K. Champagne. – Abington, UK: 2007, Woodhead Publishing Limited, 2007. – P. 377.
15. Papyrin, A. Cold spray technology / Papyrin, A., V. Kosarev, S. Klinkov, A. Alkhimov, and V. Fomin. Oxford: Elsevier, 2007. – P. 340.
16. Борисов Ю.С. Газотермические покрытия из порошковых материалов: Справочник / Борисов Ю.С., Харламов Ю.А., Сидоренко С.Л., Ардатовская Е.Н. – К.: Наук. Думка. 1987. – 544 с.
17. Лясников В.Н. Плазменное напыление покрытий в производстве изделий электронной техники / Лясников В.Н., Украинский В.С., Богатырев Г.Ф. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1985.- 200 с.
18. Соколов Ю.В. Плазменное формообразование: Монография / Соколов Ю.В. Мн.: УП «Технопринт», 2003. – 198 с.
19. Schneider K.E. Thermal Spraying for Power Generation Components / Schneider K.E., Belashchenko V., Dratwinski M., Siegmann S., Zagorski A. Weinheim: WILEY-VCH, 2006 - P. 286.
20. Похмурський В.І. Електродугові відновні та захисні покриття / В.І. Похмурський, М.М. Студент, В.М. Довгуник, Г.В. Похмурська, І.Й. Сидорак. Львів: Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАНУ, 2005. – 192 с.
21. Рыжов Э.В. Технологическое обеспечение качества деталей с покрытиями / Рыжов Э.В., Клименко С.А., Гуцаленко О.Г. К.: Наукова думка, 1994. – 182 с.
22. Клименко С.А. Точение износостойких защитных покрытий / Клименко С.А., Муковоз Ю.А., Полонский Л.Г., Мельничук П.П. К.: Техніка, 1997. – 146 с.
23. Пилипенко О.М. Вібраційна обробка газотермічних покриттів / Пилипенко О.М. Черкаси: Сіяч, 2000. – 203 с.
24. Харламов Ю.А. Детонационно-газовые напылительные струи / Харламов Ю.А., Харламов М.Ю. – Луганск: изд-во Восточноукр. Нац. Ун-та им. В. Даля, 2011. – 260 с.
25. Солових Є.К. Науково-методологічні основи підвищення несучої здатності функціональних покриттів конструктивними і технологічними методами / Солових Є.К. Автореферат ... д.т.н. К., 2013. – 36 с.

#### References

1. Hocking M.G. Metallic and Ceramic Coatings / Hocking M.G., Vasantasree V., Sidky P.S. // L.: Longman Group UK Limited, 1989. (M.: Mir, 2000. – P. 518).
2. Teoriya i praktika naneseniya zashchitnikh pokritiy / Vityaz P.A., Ivashko V.S., Ilyushchenko A.F. [I dr.]. – Minsk: Beloruskaya navuka, 1998. – 583 s.
3. ASM Handbook Volume 5: Surface Engineering. – Ohio: ASM International, 1994 – P. 1056.
4. Cartier M. / 2003. Handbook of Surface Treatments and Coatings / Cartier M., Polak T.A., G D Wilcox G.D. – N-Y: ASME Press, 2003. – P. 412.
5. Yushchenko K.A. Inseneriya poverhni / Yushchenko K.A., Yu.S. Borisov, V.D. Kuznetsov, V.M. Kors.- Kiev: Nauk.dumka. 2007. – 559 s.
6. Pawlowski L. The Science and Engineering of Thermal Spray Coatings: 2-nd Ed. / L. Pawlowski // Chichester, England. John Wiley & Sons, Ltd. – 2008. – P. 647.
7. Handbook of Thermal Spray Technology, edited by J.R. Davis // Ohio: ASM International. – 2004. – P. 347.
8. Tucker Jr., C. (Ed.), 2013. ASM Handbook. Thermal Spray Technology Volume 5A. - Ohio: ASM International. P. 412.
9. Kudinov V.V. Nanesenie pokritiy napileniem. Teoriya, tekhnologiya i oborudovanie / Kudinov V.V., Bobrov G.V. – M.: Metallurgiya, 1992. – 432 s.
10. Fauchais, P. Thermal Spray Fundamentals / Fauchais P., Heberlein J., Boulos M. N-Y: Springer, 2014. - P. 1600.
11. Dostanko A.P. (red.) Plazmenne protsessi v proizvodstve izdeliy elektronnoy tekhniki. Pod obshch. red. Dostanko A.P. Minsk: FUAinform. V 3-kh. t. T. 1, 2000. – 424 s.; T. 2, 2001. – 244 s.; T.3, 2001. – 292 s.
12. Alkhimov A.P. Kholodnoe gazodinamicheskoe napilenie. Teoriya i praktika / Alkhimov A.P., Klinkov S.V., Kosarev V.F., Fomin V.M. Pod obshch. red. V.M. Fomina. – M.: FIZMATLIT, 2010. – 536 s.
13. Villafuerte J. (Ed.) Modern Cold Spray: Materials, Process, and Applications / Villafuerte J. (Ed.). - Cham, Switzerland: Springer International Publishing, 2015. – P.435.
14. Champagne Victor K. (ed.). The cold spray materials deposition process. Fundamentals and applications / Ed. Victor K. Champagne. – Abington, UK: 2007, Woodhead Publishing Limited, 2007. – P. 377.
15. Papyrin, A. Cold spray technology / Papyrin, A., V. Kosarev, S. Klinkov, A. Alkhimov, and V. Fomin. Oxford: Elsevier, 2007. – P. 340.
16. Borisov Yu.S. Gazotermicheskie pokritiy iz poroshkovikh materialov: Spravochnik / Borisov Yu.S., Kharlamov Yu.A., Sidorenko S.L., Ardatovskay E.N. – K.: Nauk.dumka. 1987. – 544 s.
17. Lyasnikov V.N. Plazmennoe napilenie pokritiy v proizvodstve izdeliy elektronnoy tekhniki / Lyasnikov

- V.N., Ukrainskiy V.S., Bogatirev G.F. Saratov: Izd-vo Saratov. Un-ta, 1985. – 200 s.
18. Sokolov Yu.V. Plazmennoe formoobrazovanie: Monografiya / Sokolov Yu.V. Mn.: UP “Tekhnoprint”, 2003. – 198 s.
  19. Schneider K.E. Thermal Spraying for Power Generation Components / Schneider K.E., Belashchenko V., Dratwinski M., Siegmann S., Zagorski A. Weinheim: WILEY-VCH, 2006 - P. 286.
  20. Pokhmurskiy V.I. Elektrodogovi vidnovni ta zakhisni pokrittya / Pokhmurskiy V.I., M.M. Student, V.M. Dovgunik, G.V. Pokhmurska, I.Y. Sidorak. Lviv: Fiziko-mekhanichniy institute im. G.V. Karpenka NANU, 2005. – 192 s.
  21. Rizsov E.V. Tekhnologicheskoe obespechenie kachestva detaley s pokritiyami / Rizsov E.V., Klimenko S.A., Gutsalenko O.G. K.: Naukova dumka, 1994. – 182 s.
  22. Klimenko S.A. Tochenie iznosostoikikh zashchitnikh pokritiy / Klimenko S.A., Mukovoz Yu.A., Polonskiy L.G., Melnichuk P.P. K.: Technika, 1997. – 146 s.
  23. Pilipenko O.M. Vibatsiyana obrobka gazotermichnikh pokrittiv / Pilipenko O.M. Cherkasi: Siyach, 2000. – 203 s.
  24. Kharlamov Yu.A. Detonatsinno-gazovie napilitelnie strooi / Kharlamov Yu.A., Kharlamov M.Yu. – Lugansk: izd-vo Vostochno-ukr. Nats. Un-ta im. V. Dalhya, 2011. – 260 s.
  25. Solovikh E.K. Naukovo-metodologichni osnovi pidvishchennya nesuchey zdatnosti funltsionalnikh pokrittiv konstruktivnimi I technologichnimi metodami / Solovikh E.K. Avtoreferat ... d.t.n. K., 2013. – 36 s.

#### **Харламов Ю.О. Технологічний класифікатор деталей і поверхонь з газотермічними покриттями**

*У статті запропоновано технологічний класифікатор виробів машинобудування та їх поверхонь з покриттями, отриманими методами газотермічного напилення. Технологічний класифікатор складається з трьох частин: базової, що кодує основну інформацію про напилювані вироби; технологічної, що кодує основну інформацію про деталі і напилювані поверхні і технологічної, що кодує інформацію про газотермічні покриття. Показані перспективи застосування класифікатора при розробці систем автоматизованого*

*проекування технологічних процесів виробництва деталей з газотермічними покриттями.*

**Ключові слова:** газотермічне напилення, кодування, маршрутна технологія, поверхня, покриття.

#### **Kharlamov Y.A. Technological Classification of Thermal Sprayed Parts and Surfaces**

*Today, thermal spraying is mostly used for machine parts which have to meet the most exacting demands. Owing to the various factors influencing coating quality these quality standards can be met only by using computer – controlled spray systems.*

*Process development of thermal spraying must result in a repeatable stable manufacturing and quality-assurance process. The process capability requires a good interaction between design and manufacturing. The result is a product that can be manufactured by a defined and released manufacturing process.*

*This paper proposes a technological classifier of thermal sprayed parts and working surfaces. The technological classifier consists of three parts: 1. a base encoding basic information about the thermal sprayed product; 2. Technological part of classifier for encoding mainly information on the design elements of thermal sprayed part and surfaces to be sprayed; 3. Technological part of classifier for encoding mainly information on thermal sprayed coatings.*

**Keywords:** gas-thermal spraying, coding, routing technology, surface coating.

**Харламов Юрій Олександрович** – д.т.н., проф., професор кафедри машинобудування та прикладної механіки, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Сєверодонецьк) [yuriy.kharlamov@gmail.com](mailto:yuriy.kharlamov@gmail.com)

*Рецензент:* д.т.н., проф. **Марченко Д.М.**

Стаття подана 21.09.2016