

УДК 004.78:004.056

## ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ВОССТАНОВЛЕНИЯ И УПРОЧНЕНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ С ЗАДАНЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ В ВИДЕ ОБЛАЧНОГО СЕРВИСА

*д-р. техн. наук, проф. А.А. СМИРНОВ, канд. техн. наук, доц. Т.В. СМИРНОВА,  
канд. техн. наук, доц. А.Н. ДРЕЕВ  
(Центральноукраинский национальный технический университет, Кропивницкий),  
канд. техн. наук, доц. А.В. ДУДАН  
(Полоцкий государственный университет)*

*Рассматривается построение математической модели оптимизации технологического процесса восстановления и упрочнения поверхностей с заданными характеристиками в виде облачного сервиса на основе комбинации нескольких технологических процессов. Решены следующие задачи: проанализирован абстрактный технологический процесс, его свойства и методы перехода к конкретному технологическому процессу; сформулирована информационная модель технологического процесса и методы ее получения; рассмотрены абстрактные экспертные системы, их составляющие; проведен обзор известных экспертных систем оптимизации технологических процессов, приведение их к абстрактному виду; формализованы подмножества абстрактных экспертных систем оптимизации технологических процессов; формализованы рекомендательные системы для обеспечения оптимизации цепи технологических процессов как надстройки экспертной системы над экспертными системами отдельных технологических процессов.*

**Ключевые слова:** *облачный сервис, информационные технологии, экспертные системы, восстановление, упрочнение, деталь, технологический процесс.*

**Введение.** Современные линии восстановления поверхностей деталей работают в условиях гибкого изменения параметров проведения технологических операций. т.е. когда одни технологические процессы восстановления и упрочнения поверхностей могут заменяться другими технологиями восстановления и упрочнения в зависимости от видов повреждения материалов и от требований к условиям эксплуатации конечного продукта. Несмотря на активную разработку информационных систем поддержки принятия решений для обеспечения оптимизации отдельных технологических процессов [2], не хватает систем для решения задачи построения оптимизированной цепи технологических процессов с выбором более оптимального процесса среди альтернативных [5]. Кроме того, с развитием компьютерных технологий возрастает актуальность использования облачных технологий в реализации информационных систем. В связи с этим в информационном обеспечении экспертных систем оптимизации цепи технологических процессов было решено реализовать облачную рекомендательную систему как сервис (SaaS) для получения поверхностей валов из стали 45 с заданными характеристиками на основе комбинации нескольких технологических процессов. Достижение поставленной цели требует решения ряда задач, однако для их формулирования и определенности в применяемых облачных информационных технологиях необходимо определить виды и область применения экспертных и рекомендательных систем для обеспечения оптимизации цепи технологических процессов.

### **Основная часть**

*Абстрактный технологический процесс, его свойства и методы перехода к конкретному технологическому процессу.* Поиск оптимальных решений при проектировании технологического процесса с несколькими операциями восстановления поверхностей изношенных валов имеет ряд особенностей. Технологический процесс должен состоять из цепи отдельных технологических операций, каждая из которых из-за разных причин может быть заменена на технологическую операцию на другой основе, но аналогичную по полученному результату. Другими словами, каждый этап обработки – подготовка поверхности, восстановление, механическая обработка, упрочнение поверхности – создает цепь технологических операций, где каждая операция может быть выполнена несколькими методами. Для любого этапа обработки характерна технологическая наследственность, когда использование обработки ограничивается за счет условий, наложенных предыдущей использованной операцией. Проблемой является частичная технологическая наследственность, когда следующие операции частично перекрывают несколько предыдущих, что значительно усложняет полный граф возможных цепей проведенных операций. В связи с этим оптимизация процесса восстановления и упрочнения деталей невозможна к определению полной цепи обработки [5].

Для оптимизации технологии по цепи технологического процесса используют экспертные системы, общая структура которых показана на рисунке 1.

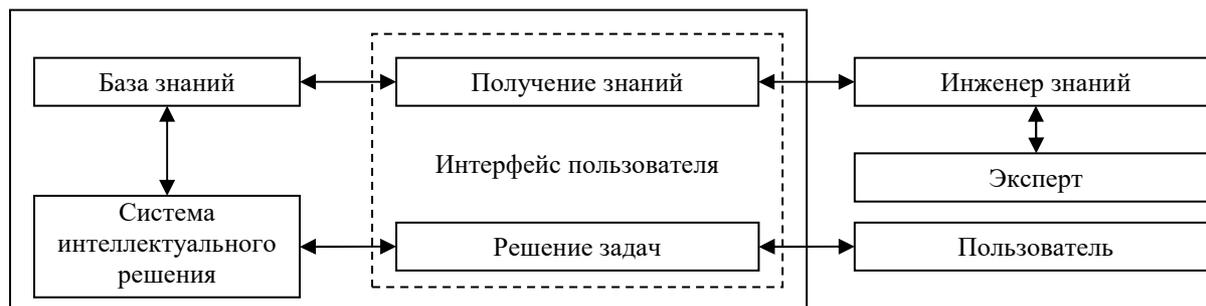


Рисунок 1. – Абстрактная экспертная система [1]

В схеме использованы следующие обозначения:

- эксперт – специалист по данной технологической операции;
- инженер знаний – специалист, который формализует знание экспертов, отвечает за процесс получения знаний и предоставление их к базе знаний экспертной системы;
- база знаний – множество доступных знаний относительно избранной технологической операции;
- система интеллектуального решения – ключевой элемент экспертной системы, который на основе имеющихся знаний и входных параметров поставленной задачи предоставляет параметры технологического процесса с оптимизацией заданными критериями (время работы, доступные материалы, совокупные денежные затраты);
- интерфейс пользователя отвечает за взаимодействие между компьютерными системами и человеком.

Рассмотрим экспертные системы на основе объектного подхода к классификации методов представления знаний (рисунок 2).



Рисунок 2. – Методы представления знаний в экспертных системах

К приведенному абстрактному представлению экспертной системы принадлежат следующие разновидности экспертных систем: семантические, фреймовые, продукционные, нейросетевые.

*Семантические экспертные системы* оперируют сущностями и их атрибутами. Атрибут может иметь количественные характеристики, которые относятся к классу свойств сущностей. Технологические операции имеют сущности в виде технической детали, когда в процессе восстановления атрибуты этой детали необходимо перенести из входного диапазона значений к заданным параметрам. Важное значение в технологической операции имеют технологические инструменты, когда для проведения обработки выбираются именно те, которые имеют соответствующие атрибуты с определенными значениями этих атрибутов. В процессе решения система должна учитывать изнашиваемость инструментальной базы и соответственно учитывать стоимость инструментов по отношению к окончательной стоимости проведенных операций. Формально семантический элемент  $C_i$  можно представить следующим образом:

$$C_i = \langle N_i, S_i, p_i \rangle, S_i \subset S,$$

где  $N_i$  – название сущности;  
 $S$  – множество доступных атрибутов;  
 $S_i$  – множество атрибутов, которые относятся к конкретной сущности. Один атрибут может принадлежать нескольким сущностям;  
 $p_i$  – количественная характеристика атрибута (если она есть).

К недостаткам указанной экспертной системы можно отнести усложненную структуру базы знаний, когда система атрибутов не является фиксированной и может существенным образом изменяться от сущности к сущности. Совокупность сущностей и атрибутов может образовывать сложные графы зависимостей, которые неудобно описывать в стандартных таблицах релятивных баз данных.

*Фреймовые экспертные системы* являются продуктом развития семантической экспертной системы и больше напоминают объектный метод описания базы знаний. Фреймы формируют иерархию объектов, которые они представляют. Фрейм состоит из каркаса групп данных – слотов. В качестве слотов могут выступать факты, фреймы ниже по иерархии, условия применения действий и действия, которые могут выполняться над данными. Формально фрейм может быть представлен следующим образом:

$$F_i = \langle N_i, S_{1i}, S_{2i}, S_{3i} \rangle,$$

где  $N$  – название фрейма;  
 $S_1$  – множество фактов, которые определяют декларативную семантику фрейма;  
 $S_2$  – множество связей, которые указывают на другие фреймы;  
 $S_3$  – множество преобразований, которые определяют функциональную семантику фрейма.

Фреймы имеют общие черты с объектно-ориентированным методом представления знаний. Общими чертами является наследственность фреймов, наличие фрейма-образца – аналога виртуальных классов или интерфейсов, фрейм-экземпляр – аналог объекта, который является экземпляром класса. Благодаря декларативности и одновременно функциональности фреймовых и объектно-ориентированных методов предоставления знаний, эта модель имеет значительную универсальность. Также к функциональным возможностям фреймов можно отнести математические регрессионные модели и также модели, основанные на нейронных сетях и нечеткой логике. Поэтому, по причине максимального соответствия семантике из предметной области, для описания технических процессов можно предпочесть преимущество фреймам.

*Информационная модель технологического процесса и методы ее получения.* В процессе построения экспертных систем оптимизации технологического процесса необходимо пройти следующие этапы:

1. Определение входных/выходных данных.
2. Составление словаря атрибутов, которые присущи избранной технологической операции.
3. Выявление объектов и понятий.
4. Выявление связей между входными управляемыми и неуправляемыми параметрами технологической операции.
5. Определение целей оптимизации.
6. Определение стратегий определения параметров технологической операции для достижения поставленных оптимизационных задач.

Проиллюстрируем информационную модель технологического процесса на основе восстановления поверхности покрытиями после электродугового напыления. Модель разрешает получить информацию для расчета характеристик после обработки. При построении математической модели технологического процесса по обыкновению ограничиваются представлением объекта исследования в виде «черного ящика». В результате возникает потребность в функциональном увязывании входных данных и определенных неуправляемых величин с параметрами, требуемыми от технологического процесса. Для электродугового напыления, как и для большинства технологических процессов, такая функциональная зависимость будет иметь следующий вид:

$$\vec{Y} = f\left(\vec{X}, \vec{V}, \vec{Z}, \vec{R}\right), \quad (1)$$

где  $\vec{X}$  – контролируемые величины процесса. Для этих величин существуют ограничения  $x_{\min,i} \leq x_i \leq x_{\max,i}$ ;

$\vec{V}$  – известные, но неконтролируемые величины процесса;

$\vec{Z}$  – неизвестные и неконтролируемые величины;

$\vec{R}$  – случайные величины, которые влияют на процесс;

$\vec{Y}$  – параметры, которые достигаются в процессе технологической обработки. Случайная составляющая является неконтролируемой, поэтому в моделях часто ими пренебрегают, но в процессе оценивания адекватности модели обязательно делается поиск надежных интервалов ожидаемых величин с реальными результатами.

Параметры электродугового напыления, определяющие режимы технологического процесса представлены в таблице 1.

Таблица 1. – Параметры электродугового напыления

| Название параметра  | Обозначение | Допустимые границы  |
|---------------------|-------------|---------------------|
| Напряжение дуги     | $x_1$       | $U = 28..34$ В      |
| Дистанция напыления | $x_2$       | $L = 80..200$ мм    |
| Диаметр проволоки   | $x_3$       | $d = 1,2..2,2$ мм   |
| Толщина покрытия    | $x_4$       | $h = 0,5..3,0$ мм   |
| Давление            | $x_5$       | $P = 2..10$ МПа     |
| Скорость скольжения | $x_6$       | $V = 2,0..2,75$ м/с |

В результате многофакторного эксперимента с регрессией результатов на степенной полином имеем математическую модель технологического процесса электродугового напыления (ЭДН), например, для прочности сцепления:

$$y_2 = 94,5537 - 16,1578 \cdot x_1 + 8,66664 \cdot x_2 - 4,37462 \cdot x_3 - 17,2747 \cdot x_4 - 3,92423 \cdot x_5 - 16,0642 \cdot x_6 - 17,0532 \cdot x_2 \cdot x_6 - 22,4759 \cdot x_3 \cdot x_6 - 9,99573 \cdot x_4 \cdot x_6 + 1,41499 \cdot x_5 \cdot x_6. \quad (2)$$

Выходные параметры технологического процесса электродугового напыления (параметры, характеризующие качество восстановленных поверхностей) представлены в таблице 2.

Таблица 2. – Параметры, которые необходимо получить в результате обработки электродуговым напылением  $\vec{Y}$

| Название параметра  | Обозначение | Полученные границы            |
|---------------------|-------------|-------------------------------|
| Пористость          | $y_1$       | $< 10\%$                      |
| Прочность сцепления | $y_2$       | $\sigma = 30..70$ МПа         |
| Микротвердость      | $y_3$       | $6900..7300$ МПа              |
| Износостойкость     | $y_4$       | $J_h = 11..15$ мкм/км (10–12) |

Для других исходных параметров также имеем математические регрессионные отношения или правила их нахождения. Множество отношений (1) и по типу (2) составляют математическую модель технологического процесса.

В дальнейшем построение экспертной системы требует наличия соотношений для нахождения параметров, которые оптимизируются, например, денежные затраты, время обработки и израсходованный исходный ресурс соответственно:

$$G(\vec{Y}), T(\vec{Y}), E(\vec{Y}), \dots \quad (3)$$

Для технологического процесса (3) на основе математической модели технологического процесса (2) и расчета затрат на его выполнение авторами построена экспертная система оптимизации технологического процесса восстановления и упрочнения поверхности валов электродуговым напылением.

Схема предусматривает наличие итерационного поиска методом постепенного улучшения результата из начального допустимого режима работы системы. Для более надежного результата, при наличии значительной нелинейности, такой процесс можно проводить с нескольких начальных точек.

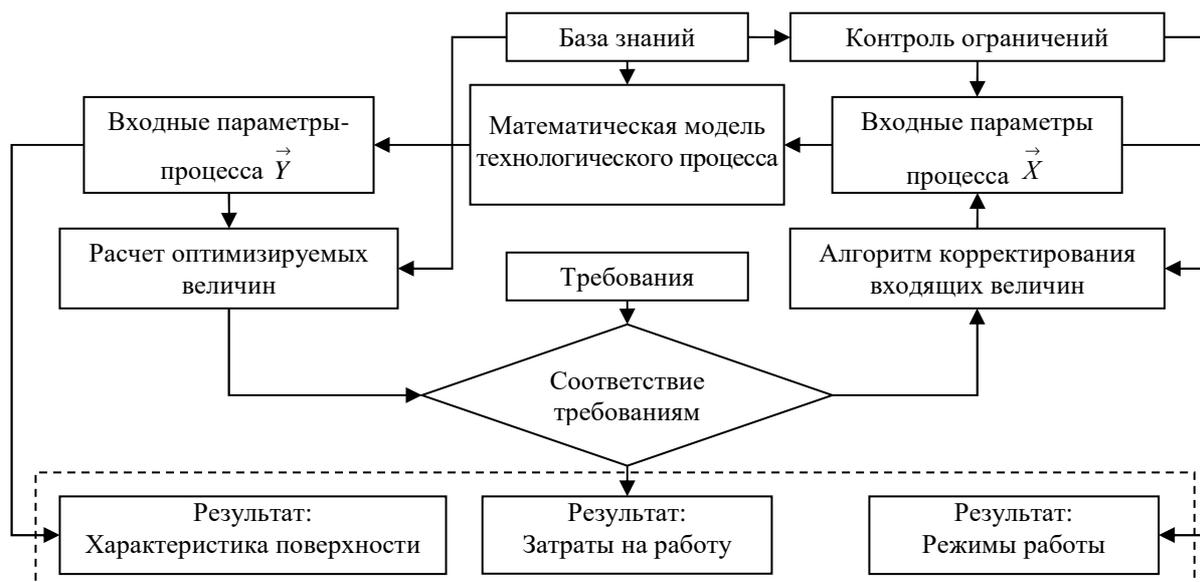


Рисунок 3. – Диаграмма потока информации для реализации экспертной системы оптимизации процесса восстановления поверхностей валов электродуговым напылением

В результате анализа информационных потоков во время оптимизации технологического процесса восстановления поверхностей электродуговым напылением получены следующие информационные единицы:

1. База знаний, которая содержит: данные экспериментов, допустимые диапазоны входных данных, список входных параметров, список выходных параметров, методы и математическое обеспечение расчетов затрат на процесс.
2. Система получения требований к результатам восстановления и критерий (или критерии) оптимизации.
3. Система поиска экстремумов в многомерном пространстве.
4. Система проверки на достижение результата.
5. Система выявления «зацикленности» поиска решений в случаях недостижимости поставленных требований.
6. Система введения неконтролируемых входных параметров (в указанной системе не использовано, т.к. оборудование имеет контролируемую среду обработки [3]).
7. Система обеспечения информационного потока между компонентами экспертной системы с учетом синхронизации и взаимных блокировок.

Перечисленные пункты являются составляющими информационного обеспечения функционирования экспертной системы.

*Абстрактные экспертные системы, их составляющие.* На основе показанной информационной модели технологической операции электродугового напыления проведены формализация и обобщение информационной модели на большинство технологических операций восстановления и упрочнения стальных поверхностей.

Математическая модель технологического процесса восстановления поверхностей на основе (1) имеет следующий вид:

$$\vec{Y}_k = f\left(\vec{X}_k, \vec{V}_k, \vec{Z}_k, \vec{R}_k\right), \quad (4)$$

где  $\vec{Y}_k \in Y$  – количественные значения подмножества характеристик поверхностей, которая получена по результатам технологического процесса  $k$ ;

$\vec{X}_k \in X$  – количественные значения подмножества известных и контролируемых параметров отдельного технологического процесса из всех доступных. Согласно предыдущим подмножествам, обозначены подмножества, которые относятся к неконтролируемым и другим входным параметрам (1).

В общем случае неизвестно количество данных для построения математической модели технологического процесса, поэтому невозможно заранее определить методы ее построения. Для этого необхо-

димо дополнить модель добавочными данными и средствами построений математических моделей  $M$ . Множество применимых методов построения математических моделей процесса будет обозначаться  $\vec{M}_k \in M$  и будет зависимо от имеющегося набора данных для построения моделей:

$$\vec{M}_k = C[M, \underline{\text{def}}Y_k, \underline{\text{def}}X_k, \underline{\text{def}}V_k], \quad (5)$$

где  $\text{def}$  определяет операцию отбора известных значений, которые будут использованы для построения математической модели.

Такое определение выбора множества методов построения математической модели объясняется тем, что при большом количестве данных можно для регрессии использовать методы на основе аппроксимаций или нейронные сети. При малом наборе данных выбор суживается к выбору между методом наименьших квадратов, сплайнов или интерполяционных операций, поэтому операция фильтрации допустимых методов (5) необходима. При дополнении базы знаний методы математического моделирования могут изменяться. Выбор метода из допустимых  $F$  может быть возложен на человека или выполняться автоматически по заранее внесенным приоритетам. Фактически экспертная система будет включать в себя вложенную экспертную систему математического моделирования и алгоритмов поиска максимумов и минимумов на ней. Результатом действия такой системы является готовая математическая модель

$$f: [\vec{M}_k, y, x, v], \quad (6)$$

где  $f$  – функция, которая использована в (4).

Редко технологические процессы являются составными сложных, многоэтапных, технологий восстановления или упрочнения поверхностей деталей. В таком случае поверхность во время обработки не принимает на выходе значения  $Y_k$ , а происходит преобразование свойств поверхности. При этом на результат могут влиять входные свойства (как при шлифовании) или не влиять (как при электродуговом напылении). Поэтому для обобщенной модели технологического процесса модель (4) необходимо дополнить входными параметрами поверхности:

$$\vec{Y}_k = F[C[M, y, x, v]](\vec{X}_k, \vec{V}_k, \vec{Z}_k, \vec{R}_k, \vec{Y}_{k-1}). \quad (7)$$

Указанные замечания и дополнения требуют внесения изменений в диаграмму движения информации (см. рисунок 3) в экспертной системе следующим образом (рисунок 4).

*Обзор известных экспертных систем оптимизации технологических процессов, приведение их к абстрактному виду.* В диссертации В.В. Лимаренко [3] представлена разработка информационной системы поддержки решений, в состав которой входит экспертная система по оптимизации технологических процессов механической обработки резанием (рисунок 5).

Согласно рисунку модель содержит рассмотренные в предыдущем пункте функции модели процесса механической обработки резанием, расчеты параметров которого можно включить в оптимизацию, выделенные входные и выходные данные. При этом к входным данным относятся требования к результату обработки изделия после напыления, ограничение на ресурсы, а к выходным – параметры технологического процесса и параметры полученного изделия с покрытием с затратами на электродуговое напыление.

Можно также отметить, что если уникальные параметры включить к множествам  $M$ ,  $V$ ,  $X$ , и  $Y$ , то запись в векторной форме (7) будет также являться обобщением и к техническим процессам механической обработки.

На рисунке 4 представлено движение информации в экспертной системе оптимизации технологического процесса, построенного на базе анализа процесса электродугового напыления. Прослеживается цикличность движения информации с проверкой достижения заданных условий. Наличие такого цикла в ряде методов поиска оптимума присутствует и в процессах механической обработки восстановленных поверхностей (рисунок 6).

Это свидетельствует о том, что обобщение технологического процесса, по крайней мере, разрешит получить информационную систему операций процесса электродугового напыления для восстановления (упрочнения) поверхностей деталей, так и для операций, которые используют при механической обработке покрытий после ЭДН.

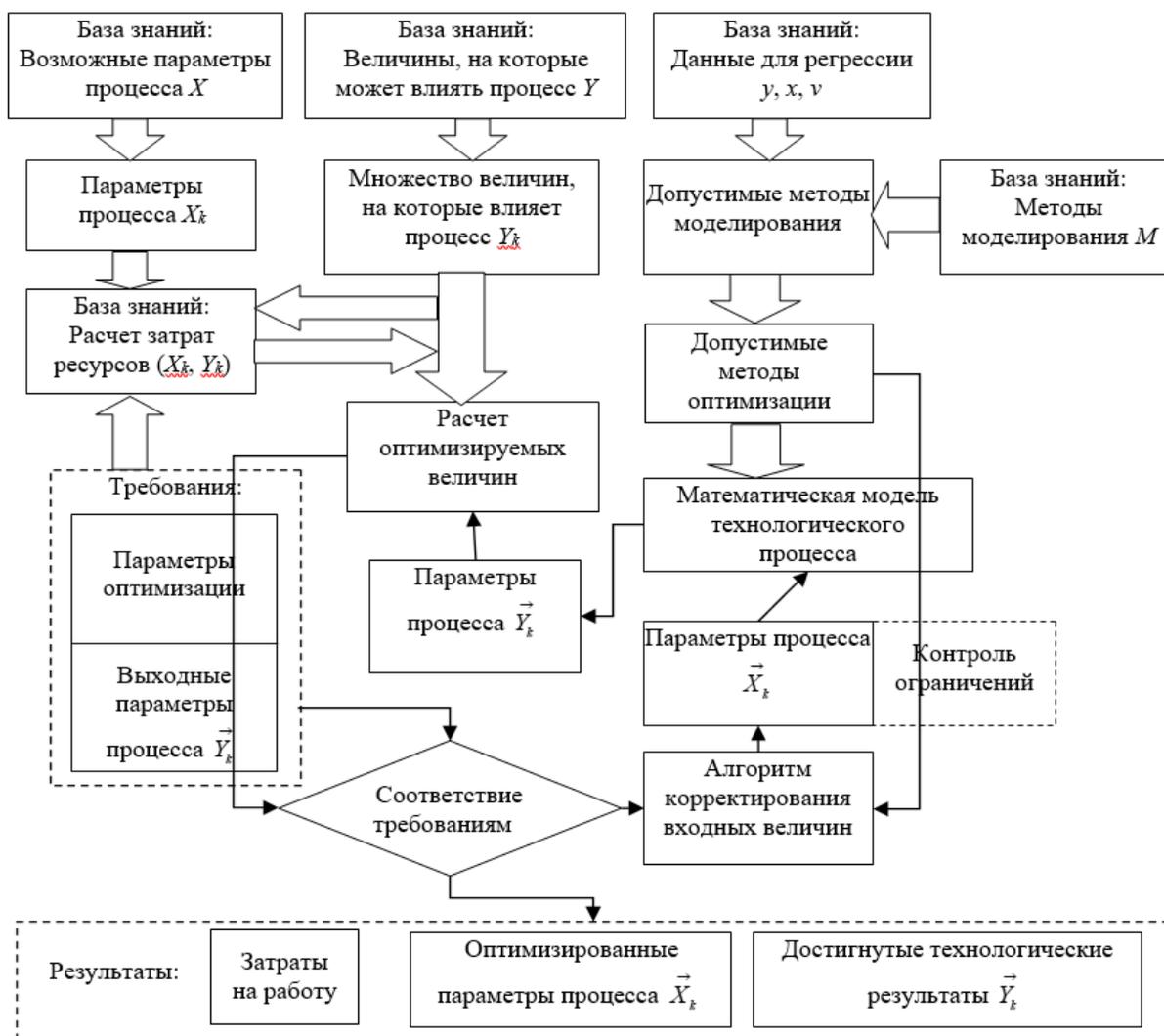


Рисунок 4. – Диаграмма потока информации в реализации обобщенной k-й экспертной системы оптимизации технологического процесса электродугового напыления

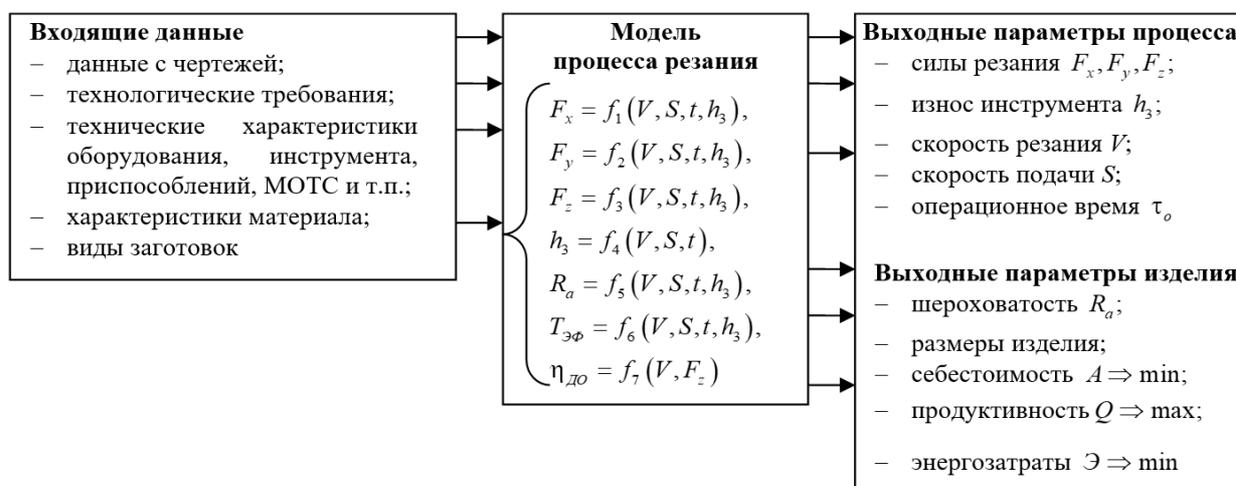


Рисунок 5. – Модель процесса механической обработки электродуговых покрытий [3]



Рисунок 6. – Схема оптимизации технологического процесса восстановления (упрочнения) методом электродугового напыления [3]

Формализация подмножества абстрактных экспертных систем оптимизации технологических процессов. На основе математического соотношения (7) и диаграммы потока информации в обобщенной экспертной системе технологического процесса (см. рисунок 4) авторами проведена формализация. Для этого использованы следующие обозначения множеств, которые формируют базу знаний для ряда технологических процессов  $S = \langle X, Y, V, M, P, D, G \rangle$ , включающую операцию выделения подмножеств элементов, касающихся отдельной технологической операции  $k$ :

1.  $X_k$  – множество управляемых параметров технологического процесса  $k$ .
2.  $Y_k$  – множество параметров детали, которые контролирует или изменяет технологический процесс  $k$ .
3.  $V_k$  – множество параметров, которые не управляются, но которые необходимо учитывать при выполнении технологического процесса  $k$ .
4.  $M_k$  – множество методов получения математической модели технологического процесса  $k$ .
5.  $P(m)$ ,  $m \in P(M_k)$  – избранный экземпляр из методов оптимизации, который применим для указанных математических моделей,  $P$  – операция выбора метода из множества методов. Операция выбора может проводиться автоматически или по выбору разработчика экспертной системы.
6.  $D_k$  – множество функций расчета материальных, в т.ч. и временных, затрат на осуществление технологического процесса  $k$ , по которым может проводиться процесс оптимизации. Сюда же входят линейные или более сложные комбинации для получения окончательной многофакторной весовой оптимизационной функции.
7.  $G_k$  – множество материальных ресурсов, используемых в технологическом процессе.

Знаком вектора, как это сделано в предыдущем пункте, на соответствующих обозначениях определяем конкретный кортеж реальных величин, которые отвечают множеству избранных величин и характеристик. Тогда (см. рисунок 4) получим следующие соотношения для отдельного технологического процесса  $k$ :

$$\left\{ \begin{array}{l} \vec{X}_k = m\left(\vec{Y}_k, \vec{V}_k, \vec{Y}_{k-1}, \vec{G}_k\right), \\ \vec{G}_k = D_k\left(\vec{X}_k, \vec{V}_k\right), \\ \left| \vec{G}_k \right| \rightarrow \min, \\ \left| \vec{G}_k \right| = \infty, \text{ если } \vec{Y}_{k-1} \notin Y_k. \end{array} \right. \quad (8)$$

Здесь более значимо значение нормирования, которое принимает содержание выделения скаляра из вектора материальных затрат. Метод выделения скаляра может сильно отличаться в зависимости от избранного технологического процесса, но в большинстве случаев за эту операцию можно принять линейную комбинацию материальных и временных затрат. В случае потребности достижения максимальности одного из показателей предлагается в линейной комбинации использовать отрицательные коэффициенты.

Сложность в поиске оптимального режима обработки ЭДН заключается в том, что система (8) содержит в качестве аргументов и результатов одни и те же множества числовых значений. При этом операции  $m$  и  $D_k$  могут иметь нелинейный характер, участки опоздания или не будут выражаться аналитически, когда процессы расчета могут выполняться декларативно, или быть результатом имитационного моделирования.

Также для применимости некоторых алгоритмов оптимизации проведено дополнение  $\left| \vec{G}_k \right| \rightarrow \infty, \vec{Y}_{k-1} \notin Y_k$ , которое вступает в силу в случае невозможного требования к технологическому процессу и возвращает значительно превышенную потребность в ресурсах. Тем самым любой процесс становится пригодным для использования, но его использование принимается за крайне неэффективное.

Такое введение разрешает добавить к алгоритмам оптимизации дополнительно большую базу поисковых эвристик. Аналитическое дополнение расчетов использованных ресурсов быстрым ростом ресурсных нужд при выходе за входные требования технологического процесса расширяет методики оптимизации градиентными спусками.

Совокупность технологических процессов  $S$  и (8) формируют формальную задачу множества технологических процессов. Добавление к базе знаний нового технологического процесса сопровождается следующими операциями:

$$\{S = S \cup S_k, S_k = \langle X_k, Y_k, V_k, M_k, P_k, D_k, G_k \rangle\}, \quad (9)$$

где  $k$  – номер добавленного к системе технологического процесса.

Графическое изображение (8) и (9) представлено на рисунке 7.

*Формализация рекомендательных систем для обеспечения оптимизации цепи технологических процессов как надстройки экспертной системы над экспертными системами отдельных технологических процессов.* Изготовление продукции требует использования последовательности технологических процессов. Например, восстановление и упрочнение поверхностей валов включает напыление металла с целью повышения их износостойкости, а затем проводится обработка поверхностей до заданных геометрических параметров с учетом допусков и требований к их качеству. Деталь с параметрами  $\vec{Y}_k$  после каждого из технологических процессов обработки имеет вид  $\vec{Y}_{k-1}$  согласно введенным обозначениям. Это формирует цепь технологических операций

$$Y = \sum_{(k)} \vec{Y}_k, \quad (10)$$

где  $k$  является экземпляром комбинаторной конфигурации из доступных технологических процессов, а  $(k-1)$  обозначает предыдущий технологический процесс.

На основе (10) можно проиллюстрировать цикл обработки как граф доступных процессов (рисунок 8).

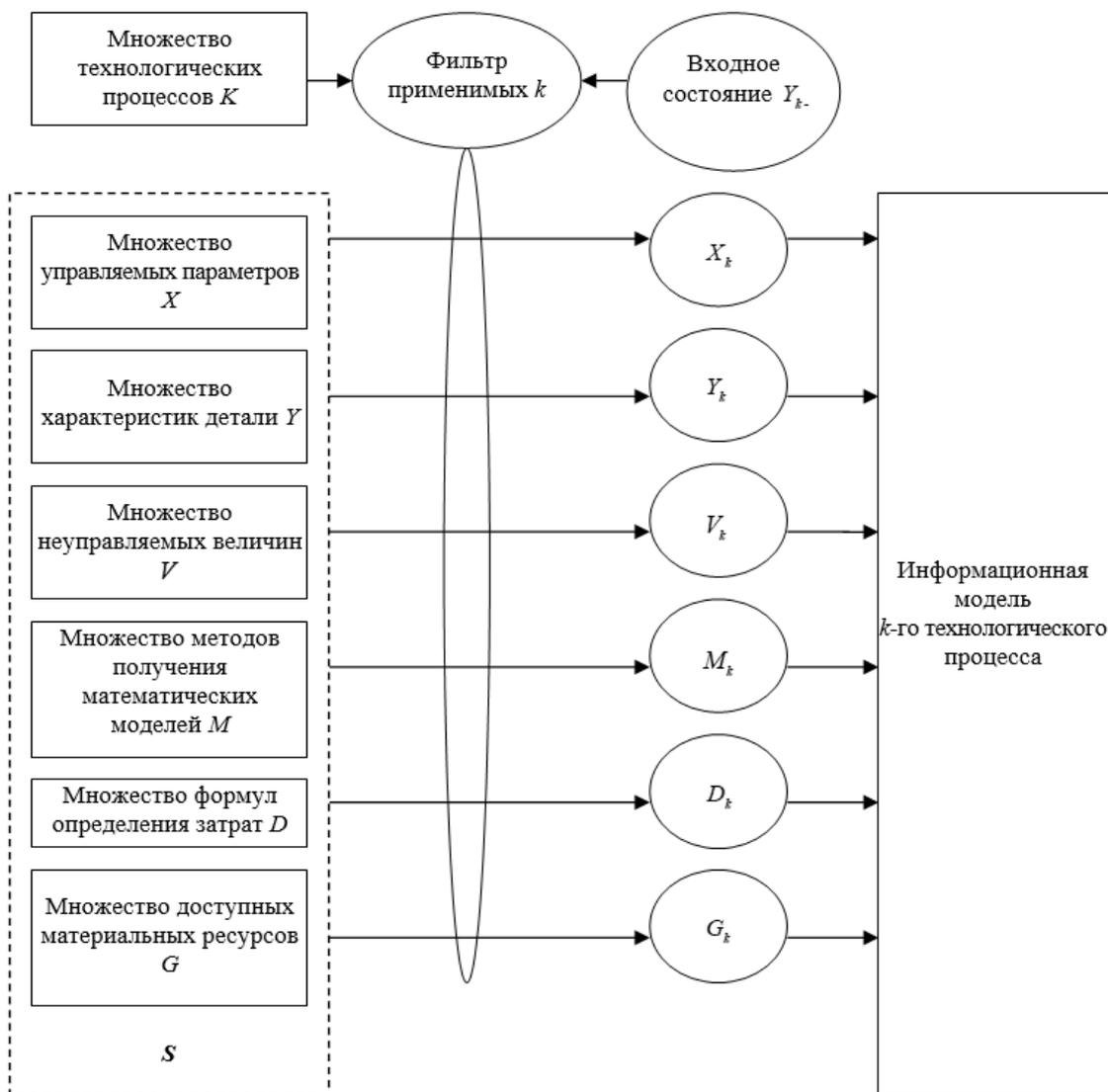


Рисунок 7. – Схема формирования отдельной информационной модели технологического процесса восстановления (упрочнения) методом электродугового напыления на основании общей базы знаний

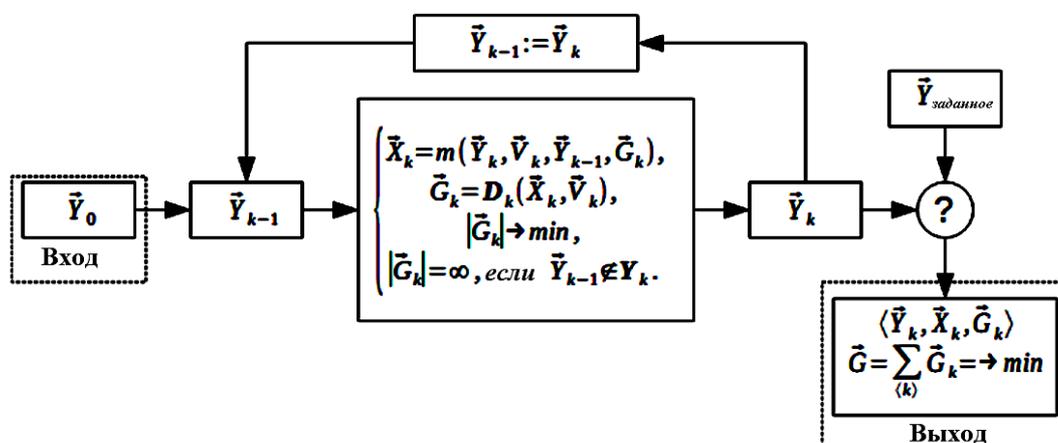


Рисунок 8. – Схема информационной модели построения цепи технологических процессов

В развернутом виде циклическое представление (см. рисунок 8) переходит в определение цепи технологических процессов следующим образом (рисунок 9), где темным цветом обозначены применимые для входного состояния технологические процессы.

Описанный граф является обобщением графа технологии производства на основе процессов механической обработки [3]. В результате совокупность отношений (8)–(10), действие которых представлено графами на рисунках 7–9, составляет обобщенную модель цепи абстрактных технологических процессов.

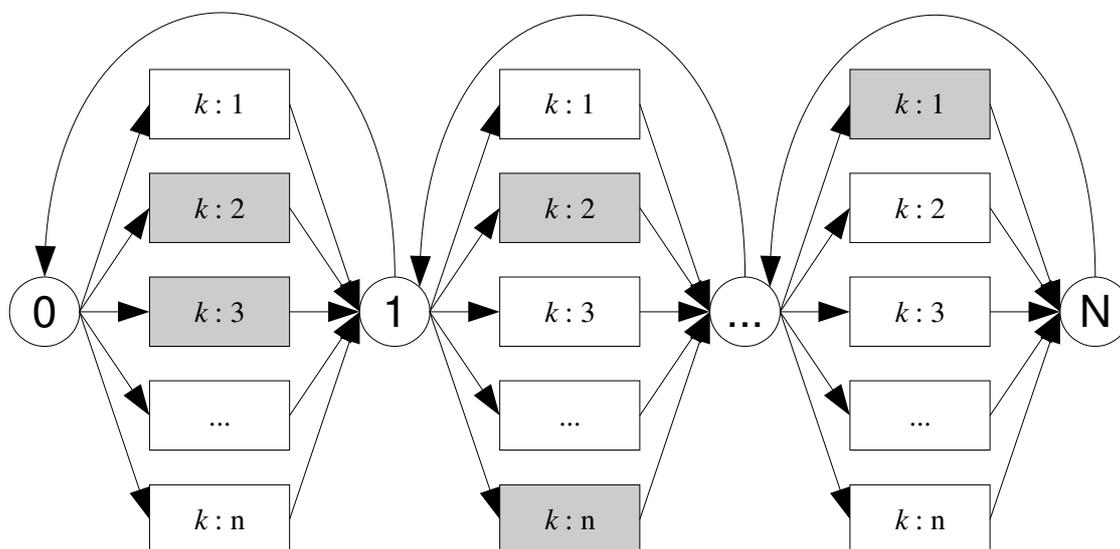


Рисунок 9. – Схема цепи технологических процессов с учетом возможных повторений операций обратными связями

**Выводы.** В работе предложен метод оптимизации технологического процесса восстановления и упрочнения поверхности валов из стали в виде облачного сервиса. Для этого были решены следующие задачи:

- рассмотрен абстрактный технологический процесс, его свойства и методы перехода к конкретному технологическому процессу;
- рассмотрена информационная модель технологического процесса и методы ее получения;
- рассмотрены абстрактные экспертные системы и их составляющие;
- проведен обзор известных экспертных систем оптимизации технологических процессов, приведение их к абстрактному виду;
- предложена формализация подмножества абстрактных экспертных систем оптимизации технологических процессов;
- предложена формализация рекомендательных систем для обеспечения оптимизации цепи технологических процессов как надстройка экспертной системы над экспертными системами отдельных технологических процессов.

Таким образом, в виде облачного сервиса предложен метод решения задачи построения оптимизированной цепи технологических процессов восстановления и упрочнения поверхностей валов с выбором более оптимального процесса среди альтернативных по задаче.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Вереск, О.М. Технологии поддержки принятия решений / О.М. Вереск. – Львов : Изд-во Львов. политехники, 2013.
2. Хох, В.Д. Исследование методов построения экспертных систем / В.Д. Хох, Е.В. Мелешко, М.С. Якименко // Системы управления, навигации и связи. – 2016. – Вып. 4(40). – С. 48–52.
3. Лимаренко, В.В. Информационная система поддержки решений для автоматизации создания технологических процессов механообработки деталей высокоточного оборудования : дис. ... канд. техн. наук / В.В. Лимаренко. – Харьков, 2019.
4. Брусило, Ю.В. Повышение ресурса авиационной наземной техники усовершенствованием технологии восстановления деталей типа вал : дис. ... канд. техн. наук / Ю.В. Брусилов. – Киев, 2015.

5. Скрипка, К.И. Экспертная система автоматизированного выбора способов восстановления сработанных деталей / К.И. Скрипка, М.А. Зенкин / Вестн. ЖДТУ. Технические науки. – 2004. – № 1 (28). – С. 66–68.

Поступила 18.12.2019

## OPTIMIZATION OF THE TECHNOLOGICAL PROCESS OF RESTORING AND STRENGTHENING SURFACES WITH TASKED CHARACTERISTICS AS A CLOUD SERVICE

A. SMYRNOV, T. SMYRNOVA, A. DREEV, A. DUDAN

*The aim of the work is to construct a method for optimizing the technological process of restoration and hardening of surfaces with specified characteristics in the form of a cloud service based on a combination of several technological processes. To achieve the goal of the work, the following tasks were solved: the abstract technological process, its properties and methods of transition to a specific technological process were considered; The information model of the technological process and methods for its preparation are formulated; Abstract expert systems, their components are considered; A review of well-known expert systems for optimizing technological processes, their reduction to an abstract form; subsets of abstract expert systems for optimizing technological processes are formalized; recommendation systems are formalized to ensure the optimization of the technological process chain, as an add-on of an expert system over expert systems of individual technological processes. The results of this work are a method for optimizing the technological process of restoration and hardening of surfaces of parts in the form of a cloud service.*

**Keywords:** cloud service, information technology, expert systems, restoration, hardening, detail, technological process.