

УДК 621.7.01:004

А.В. ДУДАН, канд. техн. наук

Полоцкий государственный университет, г. Новополоцк, Республика Беларусь

Т.В. СМИРНОВА, канд. техн. наук; А.А. СМИРНОВ, д-р техн. наук

Центральноукраинский национальный технический университет, г. Кропивницкий

ФОРМАЛИЗАЦИЯ СТРУКТУРЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОДУГОВОГО НАПЫЛЕНИЯ

В работе определено задание построения информационной системы оптимизации технологического процесса по цепи технологических операций «абразивная обработка — нанесение подслоя — нанесение основного слоя» при применении электродугового напыления для восстановления и упрочнения деталей. В результате анализа движения информации при проведении оптимизации технологического процесса на основе цепи технологические операции выявляют потребность в обеспечении в информационной системе возможности определения множества технологических операций. Это позволяет для каждой из операций обеспечить перечень управляемых и неуправляемых параметров с их ограничениями; возможность задания методов расчета для выполнения поставленных требований; возможность обеспечить задачу методов расчета временных и материальных затрат по каждой технологической операции; возможность реализации методов моделирования технологических операций в табличном виде, аналитическим или компьютерным моделированием.

Ключевые слова: технологический процесс, электродуговое напыление, формализация, экспертная система

Актуальность темы исследования. В настоящее время любая отрасль производства требует применения информационных технологий. Изготовление деталей с покрытиями, их упрочнение и восстановление не является исключением. В работе рассматривается формализация и предложена реализация структуры технологического процесса электродугового напыления для оптимизационной экспертной системы. Комбинаторная сложность технологического процесса насчитывает четыре возможных варианта. Для такого количества вариантов целесообразно проведение оптимизации для четырех цепей технологических операций с избранием лучшего результата по весовой функции. Анализ движения информации при проведении оптимизации технологического процесса на основе цепи технологических операций выявил потребность в информационной системе, что является актуальной задачей. Также актуальной является необходимость поддержки в информационной системе определения зависимостей между величинами аналитическими методами, таблично, алгоритмически и с помощью имитационных моделей.

Постановка задачи заключается в формализации структуры технологического процесса электродугового напыления для создания оптимизационной экспертной системы.

Анализ последних исследований и публикаций. В настоящее время активно разрабатываются информационные системы поддержки принятия решений для обеспечения оптимизации отдельных технологических процессов [1–8]. Систем для решения задачи построения оптимизированной цепи технологического процесса и систем выбора оптимального технологического процесса не хватает. Анализ последних исследований и публикаций показал, что вопросы применения информационных технологий в виде соответствующих экспертных систем в технологических процессах очень актуальны [1–3, 5–8]. Поэтому назрела проблема оптимизации последовательности цепочки операций технологического процесса в информационном обеспечении экспертных систем.

Выделение неисследованных ранее частей общей проблемы. Информационные единицы функционально различны, некоторые величины имеют способность изменять функциональную способность переходом от искомым величин к ограничениям на технологическую операцию, накладывают на систему управления переменными дополнительные функциональные возможности и универсальность к трансформации моделирования технологического процесса.

Изложение основного материала. Формализация структуры технологического процесса электродугового напыления. Технологический процесс (ТП) электродугового напыления (ЭДН) в процессе создания изделий с покрытиями, а также при восстановлении или упрочнении поверхностей деталей состоит из следующих этапов:

- струйно-абразивной обработки (САО);
- нанесения подслоя перед нанесением покрытия;
- основной процесс нанесения покрытия — ЭДН;
- доведение сформированной поверхности до необходимых размеров и качества путем механической обработки (МО), чаще всего шлифованием, методами поверхностно-пластического деформирования (ППД), электроконтактной обработкой (ЭКО) и другими.

Первый этап предназначен для увеличения шероховатости поверхности детали, на которую наносится покрытие. Этот процесс увеличит прочность сцепления покрытия, полученного ЭДН, с поверхностью детали и улучшит качество и срок службы детали с покрытием.

Подслоем — максимально тонкий слой материала, основной функцией которого является устранение несовместимости материала детали и материала покрытия по химическим и физико-механическим свойствам. Для обеспечения необходимой прочности сцепления системы «основа — покрытие» используется подслоем из нихрома или молибдена.

Основной процесс нанесения материала покрытия осуществляется путем расплавления его электрической дугой и перенесения с помощью струи сжатого воздуха на поверхность детали. Для предотвращения образования окислов и регулирования содержания углерода и легирующей



Рисунок 1 — Структура операций создания деталей с покрытиями методом электродугового напыления

щих элементов распыление материала покрытия осуществляется продуктами сгорания пропано-воздушной смеси.

Доведение поверхности до необходимых геометрических параметров и качества проводят МО, методами ППД, ЭКО и другими.

В результате рассмотрения процесса создания изделий с покрытиями, полученными ЭДН, и их обработки получена следующая схема цепочки технологических операций: «САО — нанесение подслоя — нанесение основного слоя — МО» (рисунок 1):

В соответствии с начальными условиями и требованиями к результату, вторая технологическая операция может и не выполняться, поэтому комбинаторной сложностью ТП являются четыре возможных варианта. Для такого количества вариантов целесообразным является проведение оптимизации для четырех цепей технологических операций и выбор лучшего результата согласно весовой функции.

Как видно из схемы движения информации на рисунке 2, которая построена на основе [1, рисунок 4], каждая технологическая операция должна отделить следующие векторы величин:

- \bar{X} — контролируемые величины процесса, для этих величин существуют ограничения $x_{\min,i} \leq x_i \leq x_{\max,i}$;
- \bar{V} — известные, но не контролируемые величины процесса;
- \bar{Z} — неизвестные и не контролируемые величины;
- \bar{R} — случайные величины, которые влияют на процесс;
- \bar{Y} — параметры, которые достигаются в процессе технологической обработки.

Для указанных величин ТП сформулировано уравнение (1), где параметр процесса \bar{X} является искомой величиной:

$$\bar{Y} = F(\bar{X}, \bar{V}, \bar{Z}, \bar{R}). \quad (1)$$

Однако для ТП, который состоит из цепи технологических операций, уравнение (1) превращается в систему уравнений (2):

$$\begin{cases} \bar{Y}_k = F_k(\bar{X}_k, \bar{V}_k, \bar{Z}_k, \bar{R}_k), \\ \bar{Y}_{k-1} = F_{k-1}(\bar{X}_{k-1}, \bar{V}_{k-1}, \bar{Z}_{k-1}, \bar{R}_{k-1}), \\ \bar{Y}_1 = F_1(\bar{X}_1, \bar{V}_1, \bar{Z}_1, \bar{R}_1), \end{cases} \quad (2)$$

где результаты предыдущей технологической операции могут частично или полностью входить как параметр следующей технологической операции, т. е. $\bar{X}_i \cap \bar{Y}_{i-1} \neq \emptyset$.

На практике неизвестные и случайные параметры не учитывают или допускают их использование в качестве случайных величин. В случае наличия перечня таких случайных параметров, возможно определить границы изменения управляемых величин с помощью методов или аналитического оценивания отклонения результата, или используя полнофакторный эксперимент, при смене лишь тех величин, которые входят в \bar{Z} и \bar{R} .

Технология ЭДН состоит из трех операций (3):

$$\begin{cases} \bar{Y}_3 = F_3(\bar{X}_3 \cup \bar{Y}_2, \bar{V}_3, \bar{Z}_3, \bar{R}_3), \\ \bar{Y}_2 = F_2(\bar{X}_2 \cup \bar{Y}_1, \bar{V}_2, \bar{Z}_2, \bar{R}_2), \\ \bar{Y}_1 = F_1(\bar{X}_1, \bar{V}_1, \bar{Z}_1, \bar{R}_1), \end{cases} \quad (3)$$

где F_1 — математическая модель абразивно-струйной обработки; F_2 — математическая модель процесса нанесения подслоя; F_3 — математическая модель процесса нанесения основного слоя.

Благодаря разделению технологических операций упрощается построение целевой функции. Отдельно строятся функции по следующим параметрам соответствия к требованиям готового изделия:

$$G(\bar{Y}_3) = \sum_{i=0}^{n-1} \text{ReLu}(\bar{Y}_i - \bar{Y}_i^*); \quad (4)$$

$$\text{ReLu}(x) = \begin{cases} x, & \text{if } (x > 0), \\ 0, & \text{if } (x \leq 0), \end{cases}$$

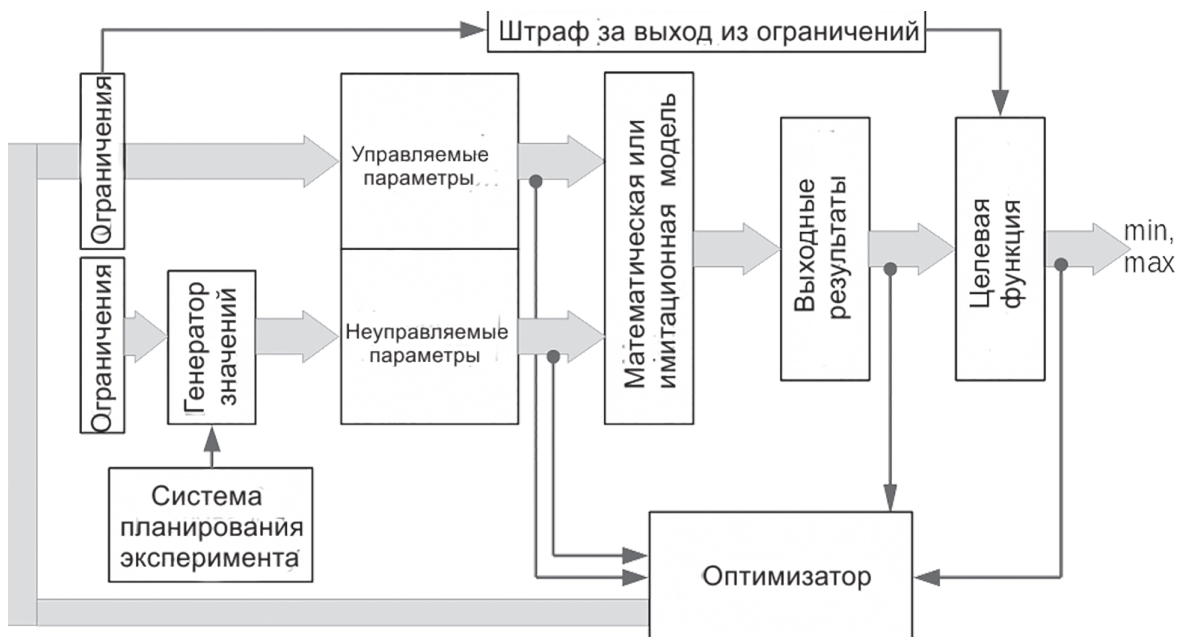


Рисунок 2 — Схема движения информации в процессе оптимизации ТП создания поверхностей деталей с покрытиями методом ЭДН

где \vec{Y}_3 — требования к изделию, как n -измеримый вектор значений; \vec{Y}_3 — результат обработки; I — индекс параметра в векторе; $\text{ReLu}(x)$ — функция отсечения отрицательных значений (5):

$$\text{Re Lu}(x) = \begin{cases} x, & \text{if } (x > 0), \\ 0, & \text{if } (x < 0). \end{cases} \quad (5)$$

В результате анализа движения информации при проведении оптимизации ТП на основе цепочки технологических операций выявлена потребность в информационной системе:

- возможности определения множества технологических операций F_k ;
- для каждой из операций обеспечить перечень управляемых \vec{X}_k и неуправляемых \vec{Y}_k параметров с их ограничениями;
- возможность решения задачи для выполнения поставленных требований $G(\vec{Y}_k)$;
- возможность обеспечить разрешение задачи формирования методов расчета временных и материальных затрат по каждой технологической операции;
- возможность обеспечить реализации методов моделирования технологических операций (3) в табличном виде, аналитически или компьютерным моделированием.

В результате анализа операций подготовки поверхности деталей перед напылением САО, нанесения подслоя и слоя основного покрытия методом ЭДН, выделены величины, которые могут выступать в качестве управляемых параметров ТП. Показана необходимость поддержки в информационной системе определения зависимостей между величинами аналитическими методами, таблично, алгоритмически и с помощью имитационных моделей. Рассмотренные информационные единицы функционально различны, некоторые величины способны изменять функциональные свойства переходом от искомым величин к ограничениям на технологическую операцию, что накладывает на систему управления переменными дополнительные функциональные возможности и универсальность к трансформации моделирования технологического процесса.

Минимальное значение (4) — это ноль, когда все параметры соответствуют или превышают заданные требования. В случае необходимости, когда результаты обработки превышают заданные параметры, можно $\text{ReLu}(x)$ заменить абсолютным значением или квадратичной функцией. Тогда поверхности должны иметь похожие характеристики материалов, потому что здесь является важным уменьшение именно отклонения параметров от заданных величин. Часто для таких случаев используют декартово расстояние на многоизмеренном пространстве, что открывает возможность использовать для многих случаев аналитические методы оптимизации — метод наименьших квадратов.

В рассматриваемом примере создания деталей с покрытием повышение требований по износостойкости, твердости, прочности сцепления покрытия с основой, сверху не регламентируется, поэтому использование ограничения по степени (4) является обоснованным.

Для учета временных T и материальных M расходов соответственно используют зависимости

$$\begin{aligned} T &= \sum_{k=1}^3 T_k (\vec{X}_k \cup \vec{Y}_{k-1}, \vec{Y}_k); \\ M &= \sum_{k=1}^3 M_k (T_k, \vec{X}_k \cup \vec{Y}_{k-1}, \vec{Y}_k); \\ \vec{Y}_0 &= 0. \end{aligned} \quad (6)$$

К системе (6) добавлено $\vec{Y}_0 = 0$, потому что первая операция не требует результатов предыдущей, поэтому к управляемым величинам первой операции добавляется пустое множество. В материальные расходы входит заработная плата рабочим, аренда помещения и другие данные, которые зависят от времени проведения технологической операции, видов и объемов материалов и энергоносителей в денежном эквиваленте. Полная функция потерь G , результат которой должен быть действительным числом, является линейной комбинацией (4) и (6):

$$G = c_0 G(\vec{Y}_3) + c_1 \sum_{k=1}^3 M_k + c_2 \sum_{k=1}^3 T_k \rightarrow \min, \quad (7)$$

где c_0, c_1, c_2 — положительные действительные коэффициенты, отражающие приоритетность достижения тех или иных показателей.

В случае необходимости соблюдения технических требований к изделию и ограничения максимального времени производства выражение (7) можно представить в другой форме, например:

$$\begin{cases} G(\vec{Y}_3) = 0, \\ c_1 \sum_{k=1}^3 M_k + c_2 \sum_{k=1}^3 T_k \rightarrow \min. \end{cases} \quad (8)$$

Это свидетельствует о разделении весового выражения на требования и критерий оптимальности, где требования может быть несколько, а критерий оптимальности должен быть единым. В случае отсутствия критических требований, критерия оптимальности (7) достаточно для оптимизации цепочки технологических операций.

Реализация структуры технологического процесса ЭДН. Согласно формализованным записям (3), (6) и (8), для построения системы оптимизации нужно определить перечень используемых переменных и зависимостей. Методом полнофакторного планирования и проведения эксперимента определены параметры, которые с достаточной точностью дают возможность управления результатами обработки [10]. Пример экспериментальной зависимости изменения прочности сцепления основы с нанесенным покрытием приведен в таблице 1 [9].

В результате для первой операции САО используются следующие основные параметры: t_1 — время обработки; p_1 — давление воздуха; P_1 — энергопотребление оборудования для САО; r_1 — время амортизации оборудования; m_1 — стоимость оборудования; m_{p_1} — стоимость энергетических ресурсов и материалов, используемых в единицу времени в выбранном режиме работы; σ — твердость материала, который обрабатывается.

Однако не все указанные величины влияют на прочность сцепления покрытия: $Y_1 = H(<t_1, p_1, \sigma, \{\text{химический состав основы}\}, \{\text{вид покрытия}\}, \{\text{технология нанесения покрытия}\})$, где $t_1 = T_1 (<p_1, \sigma)$ — здесь время обработки зависит от давления воздуха в системе, т. е. от силы взаимодействия абразива с материалом и от твердости обрабатываемого материала. Абразив в этом процессе считается неизменным и входит в стоимость

Таблица 1 — Влияние способа подготовки поверхности из стали 20 на прочность сцепления ее с покрытием из проволоки 40Х13

Способ подготовки поверхности	Шероховатость R_z , мкм	Прочность сцепления, МН/м ²
Механическая обработка	10	50
	14	65
	16	120
Струйно-абразивная обработка корундом зернистостью 450–980 мкм при давлении воздуха 0,45 МПа	20	56
	22	101
	24	115
	27	140
	36	90
	38	65
	39	35
Струйно-абразивная обработка стальной дробью 0,5...1 мм при давлении воздуха 0,45 МПа в течении 150 с	2..3	43..72

оборудования; $M_i = M_i (<t_1, r_1, P_1, m_1, m_{p1}, p_1>)$ – материальные затраты в основном зависят от времени работы оборудования. От режима работы зависит и мощность энергопотребления. Материальные затраты сводят к скалярной величине через их стоимость, или по количеству или по времени использования в процессе.

Зависимость указанных величин можно увидеть в таблице 2.

В таблице 2 приведены названия величин, которые учитываются в процессе оптимизации технологической операции САО поверхности для повышения адгезии A

до заданного значения при минимальных затратах ресурсов. Некоторые величины из таблицы 2 имеют взаимную зависимость, что свидетельствует о том, что образуется система возможно нелинейных уравнений с несколькими неизвестными. В общем случае такую систему решать аналитически нецелесообразно по причине отсутствия способов аналитического решения или значительной сложности этих методов решения. Зато для выражения группы искомых параметров через известные параметры с выполнением наложенных на них ограничений и достижения минимального / максимального значения весовой функции используют численные методы и аналитические регрессионные полиномы по экспериментальным данным.

Следующие этапы обработки проводят на одном и том же оборудовании, только процессы, отличные в материалах, которые образуют слой и подслоя, а также отличаются толщина слоя и подслоя.

Подслоем используется в технологии ЭДН, когда материал поверхностного слоя имеет химическую несовместимость с основным материалом, или основной слой не может образовать достаточную адгезионную прочность с основным материалом. Поэтому материал для образования подслоя должен быть химически нейтральным к материалу детали и основного слоя (покрытия) и иметь достаточную адгезию к материалам основы и покрытия.

В особых случаях оправдано использование прослойки из молибдена или нихрома, имеющих высокую адгезию с большинством материалов. Важно то, что для подслоя достаточно нанесения материала в несколько десятков микрон, поэтому использование молибдена или нихрома не влечет к значительному росту стоимости процесса. Приведем результаты экспериментов по ЭДН покрытий (таблица 3) [10].

Таблица 2 — Величины, которые будут учитываться на подготовительном этапе создания изделий с покрытием или их восстановления и упрочнения

№	Название	Обозначение	Зависимость
1	Час обработки	t_1	Искомое/заданное p_1, σ , {вид покрытия}, {технология нанесения покрытия}
2	Давление воздуха	p_1	Искомое t_1, σ , {вид покрытия}, {технология нанесения покрытия}
3	Энергопотребление оборудования для струйно-абразивной обработки	P_1	Искомое p_1
4	Время амортизации оборудования	r_1	Заданное p_1
5	Стоимость оборудования	m_1	Заданное
6	Стоимость энергетических ресурсов и материалов	m_{p1}	Заданное
7	Твердость материала, который обрабатывается	σ	Заданное
8	Химический состав основы	{химический состав основы}	Искомое/заданное из перечня доступных {вид покрытия}, {технология нанесения покрытия}
9	Вид покрытия	{вид покрытия}	Искомое/заданное из перечня доступных {химический состав основы}, {технология нанесения покрытия}
10	Технология нанесения покрытия	{технология нанесения покрытия}	Искомое/заданное из перечня доступных {химический состав основы}, {вид покрытия}
11	Прочность сцепления (адгезионная прочность)	A_1	t_1, p_1 , {химический состав основы}, {технология нанесения покрытия}, {вид покрытия}

Таблиця 3 — Параметри, які враховують на етапі ЕДН в процесі нанесення покриттів при виготовленні, відновленні та упрочненні деталей

№	Назва	Обозначення	Залежність
1	Напруга дуги	U	Іскомое 28...34 В
2	Дистанція напылення	L	Іскомое 80...200 мм
3	Діаметр проволочки	d	Іскомое 1,2...2,2 мм
4	Товщина підслоя	h	Іскомое: 0,5...3,0 мм — для покриття; <0,5 — для підслоя
5	Давлення в камері	p	Іскомое 2..10 МПа
6	Швидкість сколюження	v	Іскомое 2,0...2,75 м/с
7	Пористість	ρ	Іскомое/заданное, <10 %
8	Мікротвердість	σ	Іскомое/заданное, 6900..73 000 МПа
9	Ізносостійкість	J	Іскомое/заданное, 11...15 мкм/км (10^{-12})
10	Хімічний склад основи	{хімічний склад основи}	Заданное из перечня доступных {вид покриття}
11	Вид покриття	{вид покриття}	Іскомое/заданное из перечня доступных {хімічний склад основи}

Для побудови математических залежностей для ЕДН був використаний метод регресійного аналізу та експериментальні дані [10]. Згідно з вибраним методом реалізації математическої моделі процесу користувач інформаційної системи повинен використовувати аналітическі моделі, табличне завдання залежності між величинами, аналітическі або алгоритміческі методи числових засобів моделювання процесу, який оптимізується.

Висновки. В результаті аналізу руху інформації при проведенні оптимізації технологіческого процесу на основі ланки технологіческих операцій виявлено потребу в забезпеченні інформаційної системи можливості: визначати множество технологіческих операцій F_k ; забезпечувати для кожної з операцій перелік управляємих \vec{X}_k та неуправляємих \vec{Y}_k параметрів з їх обмеженнями; вибору методів розрахунок близьких до виконання поставлених вимог $G(\vec{Y}_k)$; вибору методів розрахунок часових та матеріальних витрат по кожній технологіческій операції по формулам (7) або (8); забезпечувати таблично, аналітическі або комп'ютерної симуляцією реалізацію методів моделювання технологіческих операцій (3).

Список літератури

1. Хох, В.Д. Дослідження методів побудови експертних систем / В.Д. Хох, Є.В. Мелешко, М.С. Якименко // Системи управління, навігації та зв'язку. — 2016. — Вип. 4(40). — С. 48–52.

2. Скрипка, К.І. Експертна система автоматизованого вибору способів відновлення спрацьованих деталей / К.І. Скрипка, М.А. Зенкін // Вісн. ЖДТУ. Технічні науки. — 2004. — № 1(28). — С. 66–68.

3. Лимаренко, В.В. Інформаційна система підтримки рішень для автоматизації створення технологіческих процесів механообробки деталей високоточного обладнання: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.06 / В.В. Лимаренко. — Харків, 2019. — 20 с.

4. Анферов, М.А. Структурна оптимізація технологіческих процесів в машинобудуванні / М.А. Анферов, С.Г. Селиванов. — Уфа: Гілем, 1996. — 185 с.

5. Балдин, К.В. Інформаційні системи в економіці: учеб. / К.В. Балдин, В.Б. Уткін. — 5-е изд. — М.: Дашков и Ко. — 2008. — 395 с.

6. Искусственный интеллект: в 3-х кн. Кн. 1. Системы общения и экспертные системы: справ. / Под ред. Э.В. Попова. — М.: Радио и связь, 1990. — 464 с.

7. Базы данных. Интеллектуальная обработка информации / В.В. Корнеев [и др.]. — М.: Нолидж, 2000.

8. Макаруч, Т.А. Облачные решения построения информационных систем управления ресурсами организации / Т.А. Макаруч, В.Ф. Минаков, В.А. Шугорев // Международный научно-исследовательский журнал. — 2014. — № 1(20). — С. 68–69.

9. Харламов, Ю.О. Міцність зчеплення детонаційно-газових покриттів на основі карбідів вольфраму та хрому / Ю.О. Харламов, О.В. Романченко, А.В. Міцик // Вісн. Східноукраїнського нац. ун-ту ім. Володимира Даля. — 2019. — № 1(249). — С. 99–107.

10. Ворона, Т.В. Підвищення зносостійкості сталевих газотермічних покриттів електроконтактною обробкою з використанням вуглецевмісних наповнювачів: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.01 / Т.В. Ворона. — Київ, 2016.

Dudan O.V., Smirnova T.V., Smirnov O.A.

Structure formalization of technological process of electric arc spraying

The paper defines the task of creating an information system for optimizing the technological process along the chain of technological operations “abrasive treatment — applying the sublayer — applying the main layer” when using electric arc spraying to restore and strengthen parts. As a result of analyzing the movement of information during the optimization of the technological process based on the chain, technological operations reveal the need to provide the information system with the ability to determine the set of technological operations. This makes it possible for each operation to provide: a list of controlled and uncontrolled parameters with their limitations; the ability to use calculation methods to meet the set requirements; the ability to provide the task of methods for calculating time and material costs for each technological operation; the ability to implement methods for modeling technological operations in tabular form by analytical or computer simulation.

Поступила в редакцію 28.08.2020.