

УДК 621.9.047

DOI: 10.12737/article_59ae90c54b8cd0.64519859

В.П. Смоленцев, д.т.н.,
М.В. Кондратьев, старший преподаватель,
Е.В. Смоленцев, д.т.н.
(Воронежский государственный технический университет,
394026, г. Воронеж, Московский пр., 14)
E-mail: Vsmolen@inbox.ru

Технология комбинированного эрозионно-лучевого нанесения покрытий

Представлен новый метод комбинированной обработки с одновременным воздействием тепловой энергии от импульса тока и подводом тепла от луча плазмы. Раскрыт механизм формирования качественных покрытий, при котором достигается формообразование толстых слоев с улучшенным микропрофилем, где выравнивание профиля микроповерхности достигается за счет воздействия концентрированной энергии, доставляемой лучом плазмы на поверхность расплавленного покрытия, вызывающей повышенную жидкотекучесть металла, стекание его с выступов в углубления и снижение высоты микронеровностей.

Ключевые слова: комбинированная обработка; электроэрозионное, плазменное покрытие; тепловая энергия; область применения.

V.P. Smolentsev, D. Eng.,
M.V. Kondratiev, Senior lecturer,
E.V. Smolentsev, D. Eng.
(Voronezh State Technical University, 14, Moskovsky Avenue, Voronezh, 394026)

Technology of composite erosion-radiation coating

A new method of composite treatment with the simultaneous impact of thermal energy of a current pulse and heat supply of a plasma beam is developed. The mechanism of a qualitative coating formation is shown at which the thick layer shaping with the improved micro-profile is achieved, where a micro-surface profile matching is achieved at the expense of the impact of concentrated energy supplied by a plasma beam to the surface of a molten coating causing an increased metal castability, its runoff from lugs into hollows and micro-irregularity height decrease.

A mechanism of combined process behavior is developed which allowed creating a procedure of the design of technological modes, defining their place in technological transitions and substantiating maximum accessible technological potentialities of the method offered at the realization of working matters for science intensive products.

The examples of the efficient use of a combined erosion-beam plasma treatment are shown, which extends a field of the method application and lightens a technological pre-production at the introduction into manufacturing science intensive products of new engineering generations.

Keywords: combined treatment; electro-erosion; plasma coating; thermal energy; field of application.

Среди известных технологических методов получения покрытий особое место занимает электроэрозионное нанесение различных металлических материалов (включая твердые сплавы) на режущие кромки режущего инструмента, переходные участки инструментов

для объемного формообразования, при восстановлении геометрии деталей (например, для устранения брака в литье, штамповках).

Однако при совершенствовании процесса наращивания толстых (до 1,5 мм на диаметр) слоев проявилось нежелательное повышение

местных неровностей поверхностного слоя и растрескивание хрупкого покрытия при резком охлаждении, что вызывало необходимость в последующей трудоемкой и не всегда возможной механической обработке. Известные [1, 2] попытки предварительного плазменного подогрева детали в месте обработки не дали стабильных положительных результатов по сохранению качества поверхности, а в ряде случаев, оказались не достижимыми из-за сложной геометрии и больших или слишком малых габаритов изделия.

Лучевые методы, в частности плазменный, используемые в машиностроении, показали возможность достижения высокой твердости, износоустойчивости и желаемого качества легирования поверхностного слоя, но только в случае, если толщина не превышает десятых долей миллиметра.

Сочетание в едином процессе тепловых воздействий (электроэрозионного и плазменного) позволяет спроектировать технологию комбинированного эрозионно-лучевого плазменного покрытия, востребованного в машиностроении, в частности для локального восстановления изношенных участков деталей [3–5], и получения качественных износоустойчивых покрытий сопрягаемых поверхностей (подшипники скольжения, запорные устройства, передачи и др.) с приданием им повышенных эксплуатационных показателей, например износоустойчивости [6, 7], термостойкости [8]. В основе всех исследований лежит теория подобия, изложенная в [9].

Механизм формирования эрозионно-лучевого покрытия. Для описания механизма необходимо принять ряд допущений, правомерность которых подтверждена комплексом экспериментальных исследований:

1. Объем металла в капле после электроэрозионного нанесения сохраняется постоянным в течение всего периода нанесения покрытия и во время воздействия луча.

2. Начальная температура капли наносимого покрытия может быть принята как температура плавления материала покрытия, увеличенная на величину подогрева лучом материала детали в зоне покрытия и постоянный запас температуры на остывание, покрытие и теплоперенос.

3. Температура, создаваемая лучом, поступающим на каплю, должна быть не ниже начальной температуры капли покрытия, а время воздействия луча должно быть не менее длительности подвода тепловой энергии, необходимой для плавления металла капли и

присадочного материала с учетом перегрева покрытия остаточной теплотой в капле после ее нанесения электроэрозионным способом.

4. Принято, что растекание капли после нанесения покрытия и воздействия луча происходит только под действием поверхностного натяжения, хотя на формирование микропрофиля могут оказывать влияние тепловые процессы, протекающие между материалами капли, детали и окружающей средой.

5. Каждый слой, наносимый электроэрозионным покрытием, за счет диффузии изменяет состав всего покрытия, включающий ранее нанесенные и наносимый слои. Особенно это касается содержания углерода при нанесении слоев углеродом высокоуглеродистых сталей.

Механизм эрозионно-лучевого нанесения покрытий включает несколько этапов: первый – это нагрев детали лучом плазмы; второй – нанесение капель покрытия; третий – выравнивание поверхности детали при воздействии луча плазмы; четвертый – формирование износостойкого покрытия лучом плазмы.

На первом этапе протекает подогрев зоны нанесения покрытия, при котором луч направляют так, чтобы предельная температура поверхности детали не превышала границы плавления металла. Далее (второй этап) происходит процесс электроэрозионного нанесения покрытия на упрочняемую поверхность участка детали при совмещении времени попадания капли на деталь с подводом тепла лучом плазмы.

На третьем этапе происходит дальнейший разогрев материала капли, увеличение ее текучести и под действием гравитационных сил и адгезионных процессов перетекание наиболее нагретого покрытия с вершин микровыступов во впадины, за счет чего осуществляется выравнивание микропрофиля поверхности. На четвертом этапе за счет химических преобразований в разогретом наружном слое обеспечивается получение износостойкого твердого покрытия.

Механизм получения покрытия эрозионно-лучевым методом может быть формализован. В качестве исходных данных должно учитываться следующее:

- достигнутые на текущий момент эксплуатационные показатели (включая износостойкость) покрытий рассматриваемого вида;
- характеристики заложенных в документации материалов и покрытий (включая жидкотекучесть, шероховатость поверхности покрытия);
- возможности технических средств техно-

логического оснащения для электроэрозионного покрытия и плазменного упрочнения, а также возможность совмещения воздействий для управления комбинированным процессом.

В качестве граничных условий для проектирования механизма можно принять:

- предельные возможности по толщине электроэрозионного нанесения требуемых качественных покрытий на заданные материалы деталей с учетом заложенных в документации требований к поверхностному слою покрытия;

- температуры плавления материалов детали и покрытия;

- показатели жидкотекучести материала покрытия.

При моделировании процесса следует рассматривать все этапы протекания механизма комбинированной обработки.

На первом этапе, где на деталь воздействует сканирующий луч плазмы, температура детали зависит от времени ее нагрева τ .

$$\tau = \frac{F_0 \cdot h_c^2}{a_{cp}}, \quad (1)$$

где F_0 – критерий Фурье; h_c – глубина слоя термического влияния; a_{cp} – средний коэффициент теплопроводности.

С учетом (1) устанавливается время τ воздействия луча, скорость его сканирования W_{cp} на длине зоны упрочнения D_0 :

$$W_{cp} = \frac{D_0 \cdot a_{cp}}{F_0 \cdot h_c^2}. \quad (2)$$

Для того чтобы объединить в комбинированном процессе действие луча для подогрева с плазменным упрочнением нужно длительность действия луча поддерживать не более времени протекания импульса $\tau_{и}$ при электроэрозионном покрытии:

$$\tau \leq \tau_{и}. \quad (3)$$

Тогда частоту (ν_{Λ}) сканирования луча вычислим по формуле

$$\nu_{\Lambda} = \frac{W_{cp}}{H_{\Lambda}} = \frac{D_0 \cdot a_{cp}}{F_0 \cdot h_c^2 \cdot H_{\Lambda}}, \quad (4)$$

где H_{Λ} – регулируемый параметр, определяющий амплитуду перемещения луча, который зависит от расстояния между срезом со-

пла и поверхностью покрытия. Выбирается в диапазоне $H_{\Lambda} = (4-6)D_0$.

Для обеспечения наибольшего допустимого (без плавления материала) подогрева детали следует рассчитать количество теплоты Q , необходимое для нагрева:

$$Q = c_{удд} \cdot m_H \cdot (t_{пл} + t_r), \quad (5)$$

где $c_{удд}$ – удельная теплоемкость подогреваемой массы детали; m_H – масса нагреваемого участка; $t_{пл}$ – температура плавления материала детали; t_r – избыточная температура, гарантирующая сохранность геометрии поверхности детали под действием тепловой энергии луча.

Масса нагреваемого участка m_H может оцениваться формулой

$$m_H = \gamma_{удд} \cdot K_d \cdot H_{\Lambda} \cdot D_0, \quad (6)$$

где $\gamma_{удд}$ – удельная плотность материала детали; K_d – коэффициент, учитывающий рассеивание тепла на нагрев соседних участков детали.

Расчеты, выполненные по первому этапу модели, являются контрольными для оценки назначения или расчета технологических режимов плазменной обработки.

На втором этапе определяющими являются параметры капли, наносимой в процессе электроэрозионного покрытия. Высоту капли можно рассчитать с учетом коэффициента перекрытия капель β и найти глубину впадины, определяющую шероховатость покрытия Rz_0 . Форма капли зависит от текучести расплавленного сплава с учетом температуры перегрева 500...600 К и давления $P_{мк}$:

$$P_k = P_{мк} + P_{атм}, \quad (7)$$

где P_k – давление на каплю, наносимую при электроэрозионном покрытии; $P_{атм}$ – атмосферное давление (может быть принято как 0,1 МПа). Поверхностное натяжение σ_n расплавленной капли можно принять как постоянную справочную величину для материала покрытия.

$$P_k = \sigma_n \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right), \quad (8)$$

где σ_n – коэффициент поверхностного натяжения на границе «жидкий металл – воздух» (табличные данные); R_1, R_2 – главные радиусы кривизны жидкости (капли). В рассматриваемом

мом случае $R_1 = R_2 = r_0$.

$$P_k = \frac{2\sigma_n}{r_0} \quad (9)$$

Из формулы (9) находим радиус капли r_0 :

$$r_0 = \frac{2\sigma_n}{P_{mn} + P_{атм}} \quad (10)$$

В формуле (10) P_{mn} является давлением фронта волны в момент разряда:

$$P_{mn} = \rho_k \cdot V_{y.v}^2 + K_{mn}, \quad (11)$$

где ρ_k – плотность материала капли; $V_{y.v}$ – скорость фронта ударной волны, которая зависит от длительности импульса, величины торцевого зазора (S_T).

Для изучаемого диапазона длительности импульса и расстояния $S_T = 10...30$ мкм скорость фронта ударной волны может быть оценена величиной $v_{y.v} = 10^4$ м/с. В случае точечного источника $v_{y.v}$ имеет сферическую форму, однако, для малой площади сечения канала разряда с достаточной точностью может применяться зависимость без учета кривизны поверхности обрабатываемого участка:

$$v_{y.v} = K_{y.v} \sqrt[4]{\frac{K_p}{\rho_k}}, \quad (12)$$

где $K_{y.v}$ – коэффициент ударной волны, учитывает среду, в которой происходит разряд (для воды $K_{y.v} = 0,7$); K_p – коэффициент, учитывающий перераспределение давления за фронтом ударной волны, характеризуют связь между мощностью разряда и временем действия импульса.

$$K_p = \frac{K_c \cdot U^2}{L_{эКВ} \cdot S_T}, \quad (13)$$

где K_c – коэффициент, учитывает перераспределение удельной мощности разряда по времени его действия. Для цилиндрической волны, действующей в течение τ_v , $K_c = 0,15$; U_{np} – напряжение на электродах, необходимое для пробоя промежутка $S_T \cdot U_{np} = 0,7U$ (здесь U – напряжение при разомкнутых элект-

тродах); $L_{эКВ}$ – эквивалентная индуктивность разрядного контура:

$$L_{эКВ} = \frac{T^2}{(2\pi)^2 \cdot C}, \quad (14)$$

где T – период действия разряда: $T = q \cdot \tau_v$ (q – скважность разрядов ($q = 2...3$)); C – емкость контура разряда (режимный параметр).

Для условий разряда при электроэрозионной обработке в водной среде (в частности это могут быть пары воды в атмосфере) ΔP_{mn} (величина, учитывающая потери давления) может в импульсе достигать 30 МПа.

Отсюда радиус капли равен

$$r_0 = \frac{2\sigma_n}{\rho_k K_{y.v}^2 \sqrt{2\pi^2 \cdot K_c \cdot CU^2} + \Delta P_{mn} + P_{атм}} \quad (15)$$

Далее может быть рассчитана высота капли h_0 , определяющая шероховатость электроэрозионного покрытия (Rz_0):

$$h_0 = \frac{3}{4\pi} \cdot \frac{\eta_{им} \cdot C \cdot U^2}{C_{уд} \cdot \rho_k \cdot (t_{ni} + \Delta t) \cdot r_0}, \quad (16)$$

где $\eta_{им}$ – коэффициент полезного действия импульса; $C_{уд}$ – удельная теплоемкость материала покрытия, $\frac{Дж}{кг \cdot К}$.

На третьем этапе рассматривается динамика растекания капли и выравнивание микроповерхности под действием подвода тепла лучом плазмы. Здесь следует математически описать образование слоя, его толщину и микроповерхность.

По аналогии с (11) при допущении $\sigma_{n1} = \sigma_n$ (σ_{n1} – поверхностное натяжение капли после дополнительного нагрева лучом плазмы) радиус капли $r_1 = r_0$.

Тогда

$$R_{z1} = \frac{2\sigma_n}{P_{mn1} + P_{атм}} - \sqrt{\frac{4\sigma_n^2}{(P_{mn1} + P_{атм})} - \beta^2 (h_1^2 + 2h_1 \cdot r_1)}, \quad (17)$$

где β перекрытие соседних капель.

На четвертом этапе формируется упрочняющий слой плазменного покрытия. Толщина этого слоя составляет несколько микрон и при заданной толщине покрытия h_1 , превышающей 100 мкм, нет необходимости рассчитывать толщину слоя плазменного упрочняю-

щего покрытия, т.к. она находится в пределах погрешности расчетов.

Тогда окончательная толщина покрытия

$$h_2 = h_1 \quad (18)$$

$$R_{z2} = R_{z1} \quad (19)$$

Полученные в процессе моделирования параметры позволяют проектировать технологические процессы комбинированной обработки с получением износостойких покрытий (рис.1).

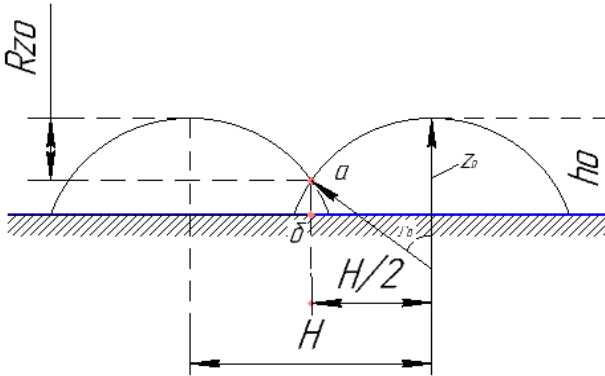


Рис. 1. Схема расчета зоны перекрытия каплей h_n и высоты неровностей Rz_0

Эксплуатационные параметры комбинированного эрозионно-лучевого плазменного износостойкого покрытия

Главными факторами, определяющими износостойкость деталей с покрытием, являются [10]:

- твердость слоев покрытия;
- толщина покрытия и упрочненного слоя;
- шероховатость поверхностного слоя (в парах трения);
- условия работы деталей (контактные напряжения, скоростные режимы, ударные нагрузки, контактное трение, температурные факторы и др.).

Для подтверждения правомерности положений разработанного механизма на созданной установке (рис. 2) были проведены экспериментальные исследования и обобщен опыт внедрения деталей с комбинированным покрытием.

На рис. 3 показаны результаты экспериментальных исследований по сравнительным испытаниям износа образцов и деталей после электроэрозионного и комбинированного покрытия жаропрочных сплавов.

На рис. 3 под индексом «3» в числителе приведены экспериментальные, а в знаменателе – расчетные значения износа (мм).

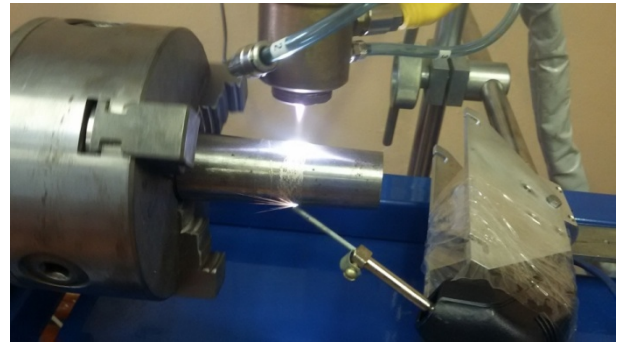


Рис. 2. Комбинированная установка для нанесения покрытий

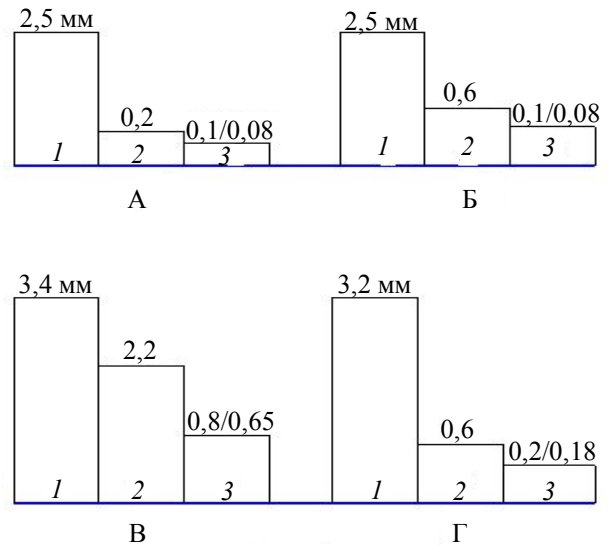


Рис. 3. Износ сплавов ВЖЛ (а) и ЭИ437Б (б) с покрытием:

А – Cr; Б – WC; В – MoS₂; Г – ZrB₂; 1 – материал без покрытия; 2 – электроэрозионное покрытие; 3 – комбинированное покрытие

Испытания проводились при следующих режимах: контактное давление образцов – 0,25 МПа; скорость относительного перемещения контактных пар 2,0...2,5 м/с; толщина покрытия 0,25 мм; температура испытаний 1200 К; длительность испытаний 350 ч.

На рис. 3 видно, что здесь хорошо подтверждается качественная сторона механизма, так как износ жаропрочных сплавов в условиях трения после электроэрозионного нанесения покрытия снизился до 10 – 12 раз, а после комбинированного нанесения покрытий – в десятки раз.

Приведенные сравнительные (эксперимент – расчет по модели) результаты показывают, что расчетные значения близки к экспериментальным, а имеющиеся отклонения объясняются изменениями условий протекания процесса ввиду нестабильности свойств материала.

лов, шероховатости поверхности покрытия, контактного давления, влияние износа упрочняющего и электроэрозионного покрытия на результаты испытаний.

На созданной машине трения были проведены испытания образцов для установления коэффициента трения (рис. 4), что является подтверждением полезности покрытия из чугуна. Материал деталей – сталь 45; покрытие на контактных парах – чугун СЧ24; контактное давление 1,6 МПа; площадь контакта – 12 см²; температура испытаний 460...500 К; скорость перемещения контактных тел 1,0 м/с. Работа со смазкой в абразивной среде.

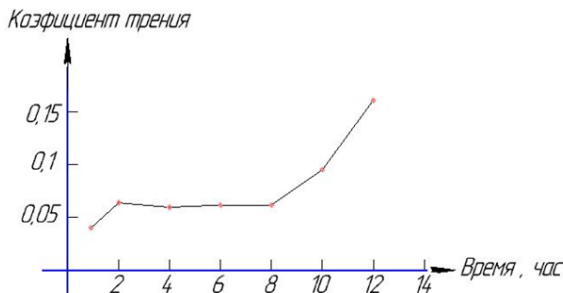


Рис. 4. Изменение коэффициента трения по мере износа покрытия

Анализ рис. 4 показывает, что коэффициент трения в течение 8 ч изменяется незначительно, затем, очевидно под действием абразива, плазменное напыление стирается и начинается интенсивное возрастание коэффициента трения, что подтверждает предлагаемый в работе механизм повышения износостойкости комбинированным методом нанесения и упрочнения покрытий.

Для повышения износостойкости и защиты от коррозии деталей из различных металлов на поверхность могут наноситься титановые покрытия. На рис. 5 приведена динамика износа стальной детали с электроэрозионным покрытием из ОТ4-1 (2) и с плазменным упрочнением (3) наносимого покрытия. Условия испытаний: контактное давление 0,3 МПа; скорость контактного перемещения между сопряженными образцами 0,3 м/с. Испытания проводились со смазкой в трансформаторном масле, содержащем 0,05 % по объему абразивного порошка из карбида бора. Пары трения работали в масле с абразивом.

Проектирование технологического процесса комбинированного нанесения качественных покрытий

С учетом разработанного механизма получения комбинированного покрытия созданы

условия для обоснованного назначения технологических режимов, что дало возможность разработать методику проектирования комбинированного процесса для нанесения износостойких покрытий на детали различного назначения, алгоритм которой представлен на рис. 6.

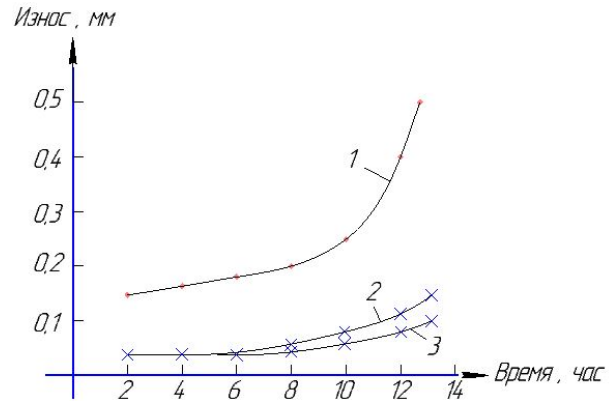


Рис. 5. Износостойкость титановых покрытий: 1 – деталь без покрытия; 2 – покрытие толщиной 0,3 мм из ОТ4-1; 3 – покрытие с плазменным упрочнением

Исходные данные ТП включают сведения о детали с покрытием, месте его расположения, сведения о требуемом покрытии, материальной и научной базе для получения кондиционной детали.

Здесь могут быть два варианта использования рассматриваемого технологического процесса:

- 1) для получения износостойкой поверхности деталей, работающих в узлах трения;
- 2) для восстановления размеров изношенных поверхностей с приданием им повышенной твердости.

Таким образом, исходные данные, приведенные на рис.6, включают:

- требования к качеству поверхностного слоя упрочненной детали, обеспечивающие эксплуатационные свойства изделия;
- анализ особых свойств материалов: детали (температура плавления, удельная теплоемкость; покрытий (жидкотекучесть, температура плавления и др.);
- состояние поверхности под покрытие – возможно ли в таком виде использовать для нанесения покрытий с применением электрического поля.

Здесь же следует проанализировать возможность реализации граничных условий:

- удовлетворяет ли шероховатость поверхности после покрытия требованиям чертежа детали;
- допустима ли температура плавления материала детали для ее сохранности в процессе

нанесения покрытия;
 – отвечает ли предельная толщина покры-

тия заданным условиям восстановления работоспособности детали.

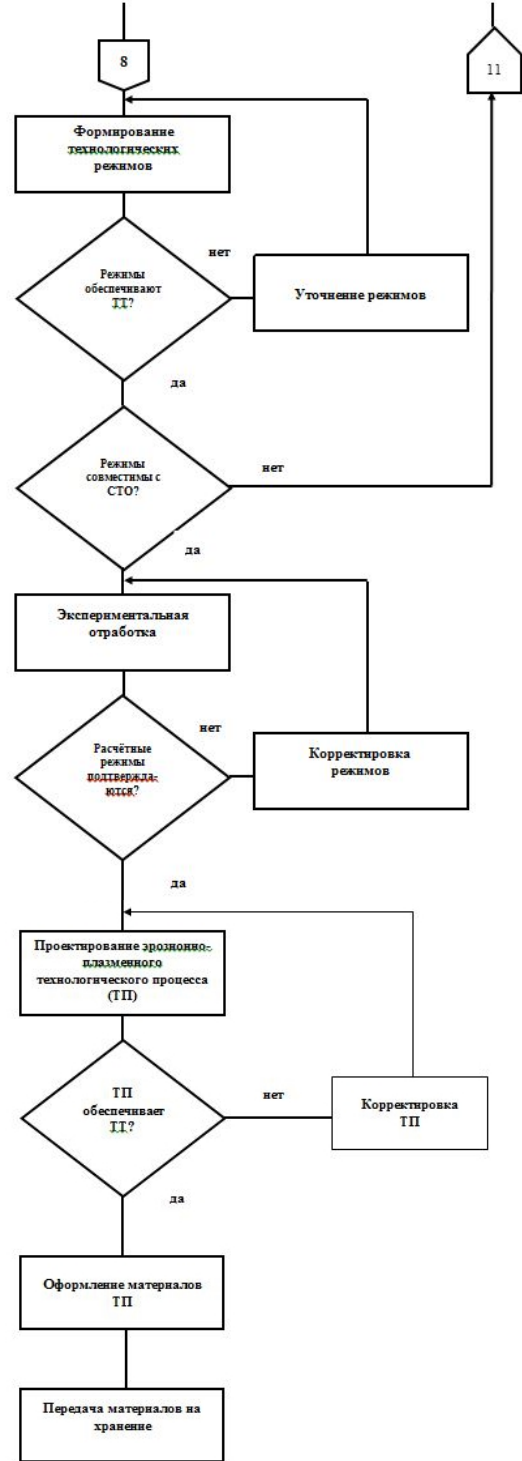
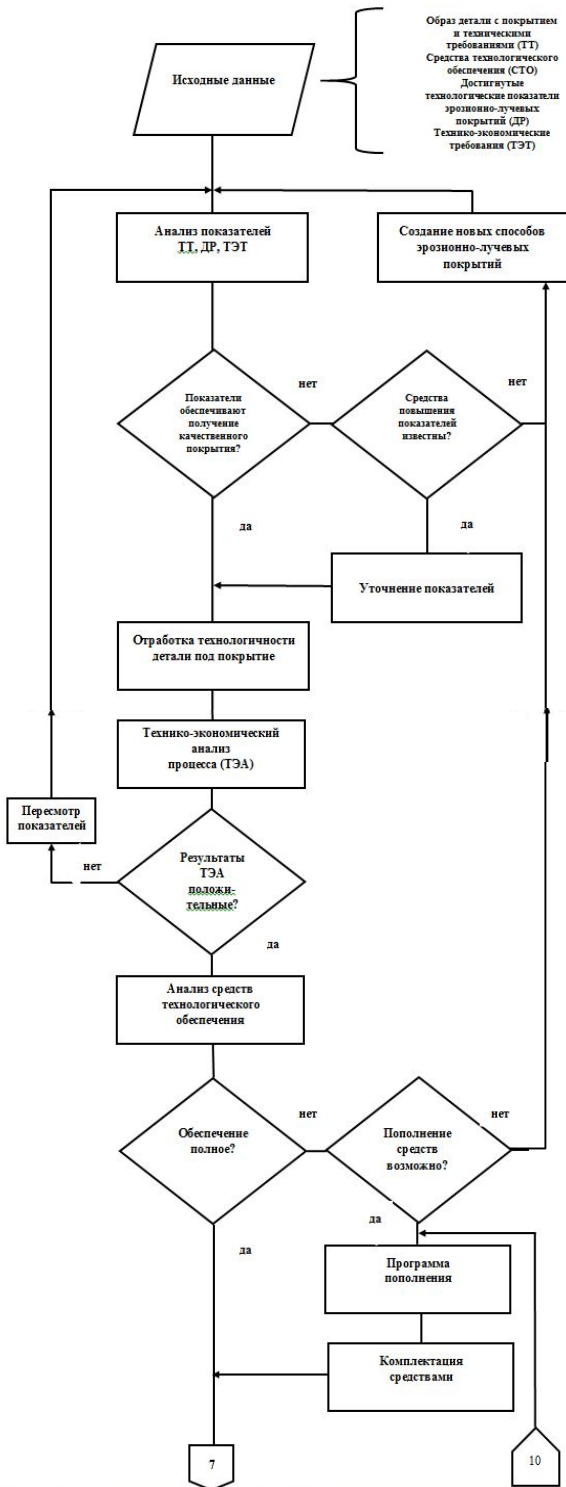


Рис. 6. Алгоритм проектирования эрозионно-лучевого технологического процесса нанесения износостойких покрытий

На первом этапе необходимо выбрать варианты реализации совмещения различных видов комбинированных покрытий [11] и обоснования выбора материалов, обеспечивающих эксплуатационные свойства изделий.

Здесь же [11] требуется провести анализ возможностей известных вариантов покрытий и обосновать применение рационального вида. Под такой вариант необходимо выполнить отработку технологичности объекта исследова-

ний, после чего разработать технологические режимы, учитывающие специфику предложенного эрозионно-лучевого способа, и спроектировать технологический процесс.

Заключение

Использование созданного способа, механизма его реализации, алгоритма проектирования комбинированного процесса позволяет расширить область эффективного использования нового процесса, снизить затраты на технологическую подготовку производства и ускорить запуск в производство новых поколений летательных аппаратов, где рассматриваемые покрытия находят наибольшее применение.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сухочев, Г.А., Коденцев, С.Н., Усков, И.А. Повышение эффективности газоплазменного напыления формированием заданного микрорельефа и упрочняющей обработкой // Нетрадиционные технологии в технике, экономике и социальной сфере: Межвуз. сб. науч. тр. Вып. 2. – Воронеж: ВГТУ, 2000. – С. 89–92.
2. Пат. 2537429 (РФ) Способ лазерного упрочнения плоской заготовки / В.П. Смоленцев, А.И. Болдырев, А.А. Болдырев, А.Н. Осиков / Заявка 20111230034 от 07.06.2011. Оpubл. 10.01.2015. Бюл. изобр. №1.
3. Бутовский, М.Э. Нанесение покрытий и упрочнение материалов концентрированными потоками энергии. Ч. 1: Электроэрозионное упрочнение. Техника и технология. – М.: ИКФ «Каталог», 1998. – 340 с.
4. Качество машин: справочник в 2-х т. / под общ. ред. А.Г. Сулова. – М.: Машиностроение, 1995. Т.1. – 256 с. Т.2. – 432 с.
5. Пат. 2396152 (РФ) Способ электроэрозионного восстановления детали из стали или чугуна / В.П. Смоленцев, А.В. Бондарь, А.Н. Некрасов / Заявка 2008120420 от 22.05.2008. Оpubл. 10.08.10. Бюл. изобр. №22.
6. Васильев, А.С. Статистическая модель трансформации свойств изделий в технологических средах // Вестник МГТУ. Сер. Машиностроение. – 1997. – № 4. – С. 13–20.
7. Васильев, А.С. Направленное формирование свойств изделий машиностроения / А.С. Васильев и др. – М.: Машиностроение, 2005. – 352 с.
8. Смоленцев, В.П., Коровин, А.А., Коптев, И.И., Салтанаева, Е.А. Технология электрохимического получения теплообменных поверхностей для интенсивного охлаждения // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2013. – №1(19). – С. 34–40.
9. Безъязычный, В.Ф. Метод подобия в технологии машиностроения. – М.: Машиностроение, 2012. – 320 с.

10. Бржозовский, Б.М., Мартынов, В.В., Зенин, Е.П. Упрочнение режущего инструмента воздействием низкотемпературной плазмы комбинированного разряда. – Саратов: СГТУ, 2009. – 176 с.

11. Сафонов, С.В. Технологическое обеспечение эксплуатационных характеристик изделий. – Воронеж: ИПЦ ВГУ, 2015. – 224 с.

REFERENCES

1. Sukhochev, G.A., Kodentsev, S.N., Uskov, I.A. Gas-plasma sputtering efficiency increase by formation of specified micro-relief and strengthening // *Nonconventional Technologies in Engineering, Economy and Social Sphere: Inter-College Proceedings. Issue. 2.* – Voronezh: VSTU, 2000. – pp. 89–92.
2. Pat. 2537429 (the RF) *Method of Flat Blank Laser Hardening* / V.P. Smolentsev, A.I. Boldyrev, A.A. Boldyrev, A.N. Osekov / Application 20111230034 dated 07.06.2011, published on 10.01.2015. Bulletin of Inventions №1.
3. Butovsky, M.E. Deposition of coatings and material hardening with concentrated flows of energy. Part. 1: *Electro-Erosion Hardening. Engineering and Technique.* – M.: IKF “Catalogue”, 1998. – pp. 340.
4. *Machine Quality: Reference Book in 2 Vol.* / under the general editorship of A.G. Suslova. – M.: Mechanical Engineering, 1995. Vol.1. – pp. 256. Vol.2. – pp. 432.
5. Pat. 2396152 (the RF) *Method of Electro-Erosion Reduction of Parts Made of Steel or Cast Iron* / V.P. Smolentsev, A.V. Bondar, A.N. Nekrasov / Application 2008120420 of 22.05.2008., published on 10.08.10. Bulletin of Inventions №22.
6. Vasiliev, A.S. Statistic model of properties transformations in parts in technological media // Bulletin of MSTU. Series. Mechanical Engineering. – 1997. – № 4. – pp 13–20.
7. Vasiliev, A.S. *Properties Directed Formation of Engineering Parts* / A.S. Vasiliev et al. – M.: Mechanical Engineering, 2005. – pp. 352.
8. Smolentsev, V.P., Korovin, A.A., Koptev, I.I., Saltanaeva, E.A. Technology of electro-chemical manufacturing heat-exchange surfaces for intensive cooling // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering.* – 2013. – №1(19). – pp. 34–40.
9. Bezyazychny, V.F. *Similitude Method in Engineering Techniques.* – M.: Mechanical Engineering, 2012. – pp. 320.
10. Brzhozovsky, B.M., Martynov, V.V., Zenin, E.P. *Cut-ter Hardening by Impact of Low-temperature Plasma of Combined Discharge.* – Saratov: SSTU, 2009. – pp. 176.
11. Safonov, S.V. *Technological Support of Product Operating Characteristics.* – Voronezh: IPC VSU, 2015. – pp. 224.

Рецензент д.т.н. О.Н. Кириллов