

ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ

УДК 621.9.048.4

В. А. Полетаев, А. Н. Трусов

МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ

Процесс электроэрзационной обработки (ЭЭО) довольно подробно изучен, выявлены влияния различных технологических режимов обработки на точность, шероховатость обрабатываемых поверхностей и производительность ЭЭО, например [3]. Однако разработка и управление ходом технологического процесса ЭЭО до сих пор недостаточно formalизованы ввиду сложности взаимосвязей технологических параметров.

При разработке технологического процесса (ТП) решается задача определения оптимальных параметров, обеспечивающих минимальные затраты при соблюдении заданных технических условий на деталь. Эта задача в общем случае разделяется на частные: разбиение общего припуска на пооперационные и выбор параметров режима на каждой операции.

Исходными данными для проектирования ТП являются: материал детали, определяющий теплофизические свойства; геометрические характеристики обрабатываемой полости; припуск на обработку; шероховатость R_a обработанной поверхности; допустимая глубина δ измененного слоя; точность обработки (допуски на размер) и допустимый износ инструмента ω .

При обработке сложнопрофильных полостей ТП в общем случае состоит из следующих операций (или переходов): предварительная, получистовая и окончательная обработка.

Цель предварительной обработки – удаление основной части припуска за минимальное время при ограничениях, накладываемых износом инструмента.

Цель получистовой обработки – получение заданной точности изготовления и уменьшение высоты неровности поверхности и толщины измененного слоя после предварительной обработки в соответствии с требованиями по шероховатости поверхности, величина которой определяет длительность доводки.

Цель окончательной обработки – получение заданной шероховатости поверхности за минимальное время.

На характер протекания и результаты процесса ЭЭО оказывают влияние различные факторы: полярность и материал электродов; электрические и временные параметры подводимых к электродам

импульсов напряжения и тока (форма, частота, скваженность, полярность и т.д.); конструктивно-технологические особенности электродов; характеристики рабочей жидкости; характер окружающей среды. В результате многочисленных исследований получены расчетные и экспериментальные зависимости, позволяющие выбрать режимы обработки в зависимости от технологической операции, качества и производительности обработки и спроектировать технологический процесс.

Для разработки последовательности ТП и алгоритмов обработки представим схему взаимосвязи исходных данных с параметрами ЭЭО исходя из теоретико-экспериментальных зависимостей, описывающих процесс ЭЭО в виде следующей схемы (рис. 1) [1], где f_p – частота следования импульсов; $1/\tau$ – скваженность; i_e – амплитуда импульсов тока; ξ – отношение пьедестала i_{e2} к амплитуде i_{e1} токовых гребней; m – число гребней в каждом импульсе; t_0^* – величина групповой паузы; t_i – амплитуда тока; u_i – амплитуда импульсов напряжения; w_e – энергия импульсов; I – величина среднего рабочего тока; f_e – частота следования разрядов; q , P – расход и давление рабочей жидкости.

Необходимая технологическая схема ЭЭО реализуется в каждом конкретном случае посредством технологической системы СПИД (станок – приспособление – инструмент – деталь) и обеспечивается требуемая взаимосвязь электрического режима с технологическими показателями процесса.

Исходя из приведенной схемы, разработка технологического процесса (операции) ЭЭО детали в общем случае осуществляется в следующей последовательности.

1. Анализ служебного назначения.
2. Анализ технологичности.
3. Разработка маршрута обработки.
 - 3.1. Назначение методов и видов обработки.
 - 3.2. Выбор оборудования.
 - 3.3. Выбор характеристик электрода-инструмента.
4. Разработка операционного процесса.
 - 4.1. Расчет припусков по переходам.
 - 4.2. Выбор режимов обработки.

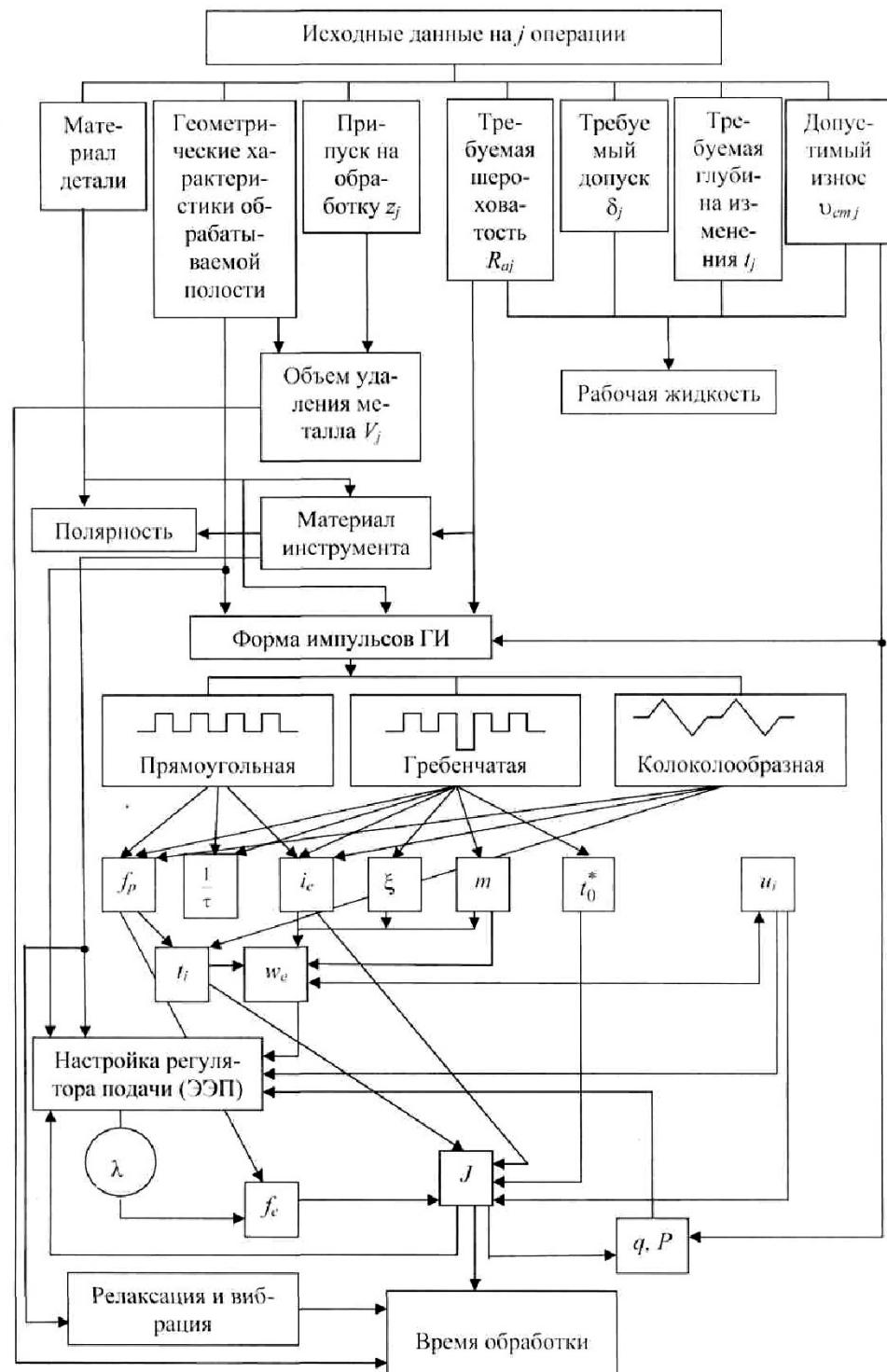


Рис. 1. Схема взаимосвязи исходных данных на j операции с технологическими параметрами ЭЭО

- выбор формы разрядных импульсов;
- выбор параметров импульсов;
- выбор параметров прокачки рабочей жидкости;
- выбор параметров релаксации и вибрации инструмента;
- определение величины межэлектродного зазора.

4.3. Расчет геометрии электрода-

инструмента.

4.4. Нормирование ЭЭО.

На основании схемы, приведенной на рис. 1, и последовательности проектирования технологического процесса (операции) разрабатывается общий алгоритм проектирования ТП(0) ЭЭО, состоящий из серии частных алгоритмов для определения припусков на обработку, требуемой точности и шероховатости обрабатываемых

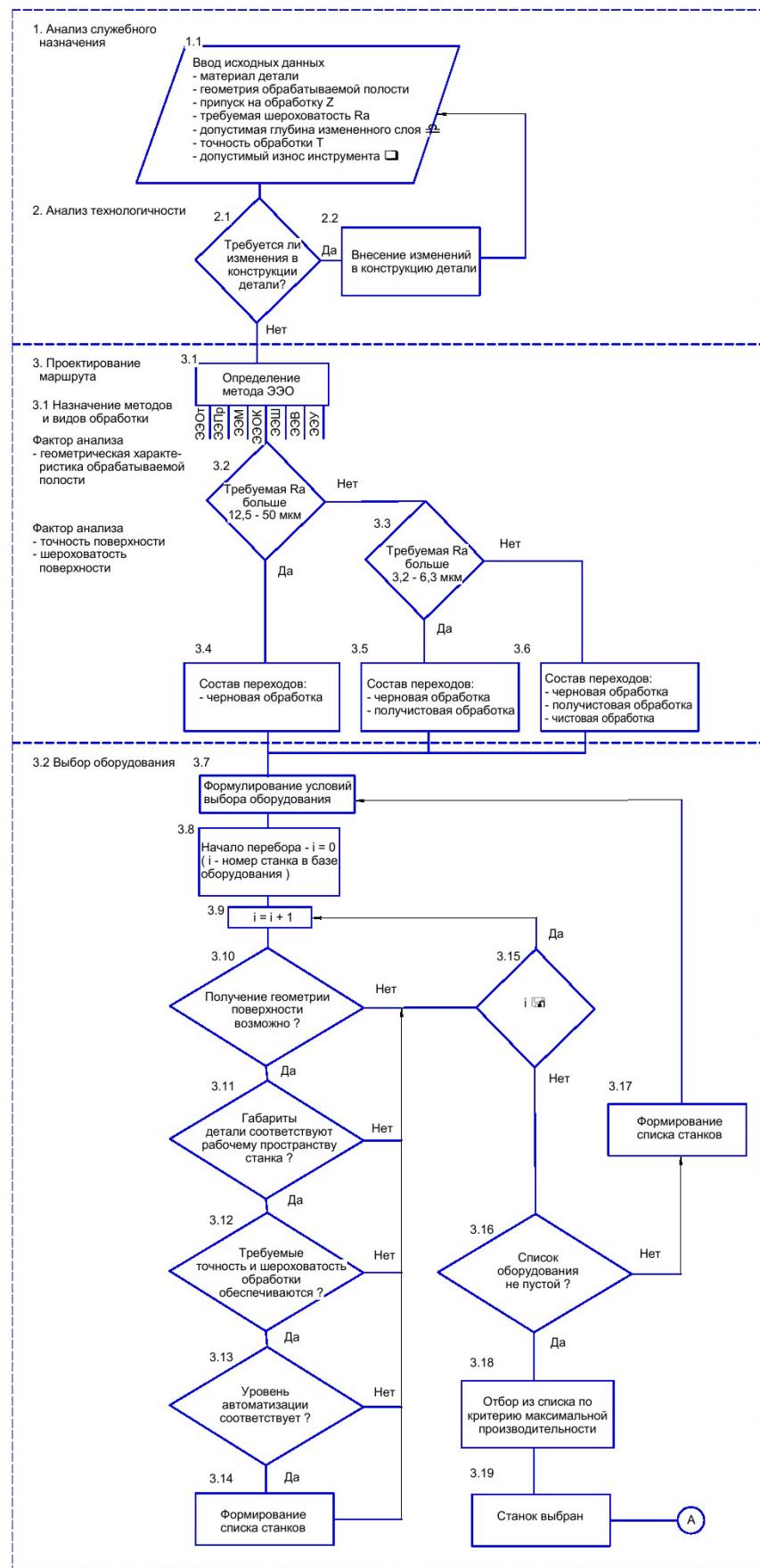


Рис. 2. Блок-схема проектирования ЭЭО

поверхностей, выбора оборудования и инструмента, выбора режимов обработки и т.д.

Подробно все этапы предлагаемой методики проектирования ЭЭО рассмотрены в [2].

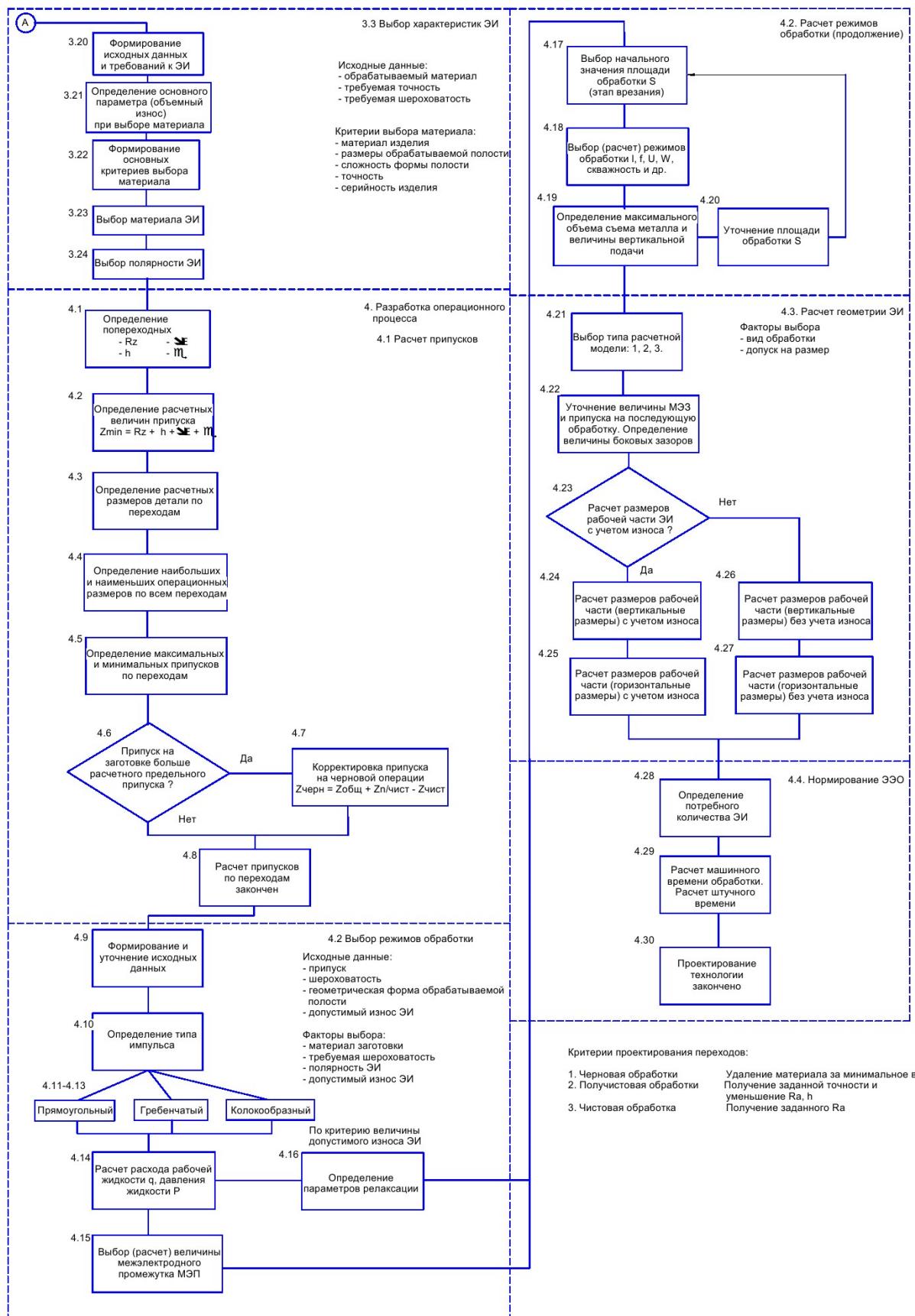


Рис. 2. Блок-схема проектирования ЭЭО (окончание)

Ниже рассматривается методика проектирования ЭЭО в аспекте повышения уровня формализации самого процесса проектирования.

Важной тенденцией развития современных электроэрозионных станков с ЧПУ является наличие автоматического модуля «автоматический

технолог», позволяющего автоматически корректировать режимы обработки, исходя из условий обработки. Для разработки технологической основы такого модуля на кафедре ИиАПС КузГТУ создан алгоритм проектирования ЭЭО (рис. 2).

Разделы 1 "Анализ служебного назначения" и 2 "Анализ технологичности" выполняются технологом вручную. В блоке 1.1 осуществляется сбор и ввод исходных данных для проектирования.

Если по результатам отработки конструкции детали на технологичность потребуется изменение конструкции (блок 2.1), то в блоке 2.2 формулируют необходимые изменения и корректируют исходные данные.

В разделе 3 "Проектирование маршрута обработки" по признаку "геометрическая характеристика обрабатываемой поверхности" и технических требований к детали определяется метод обработки ЭЭО: электроэррозионная отрезка ЭЭОт; электроэррозионное прошивание ЭЭПр; электроэррозионное объемное копирование ЭЭОК; электроэррозионное маркирование (гравирование) ЭЭМ; электроэррозионное шлифование ЭЭШ; электроэррозионное вырезание ЭЭВ; электроэррозионное упрочнение ЭЭУ.

Перечисленные методы ЭЭО по технологии существенно отличны друг от друга, создание универсальной методики проектирования технологии нецелесообразно (блок 3.1). В данной работе рассматривается методика проектирования ТП для распространенного и сложного метода – электроэррозионного объемного копирования ЭЭОК.

В блоках 3.2–3.3 идет проверка по требуемой окончательной шероховатости поверхности и проектируется состав переходов (блоки 3.4–3.6).

1. $R_a > 50 \text{ мкм}$ – обработку можно осуществить за один черновой переход.

2. $50 > Ra > 3,2$ – основной припуск снимается на черновом переходе по критерию максимальной производительности, на получистовом переходе осуществляется получение заданной точности и шероховатости обработки.

3. $R_a < 2,5$ – из-за высоких требований к качеству поверхности кроме чернового, получистового переходов требуется введение чистового (довоинчного) перехода.

В дальнейшем проектирование технологии по всем ниже рассматриваемым этапам (кроме блоков 4.28–4.29) осуществляется **по каждому переходу отдельно**.

В блоках 3.7–3.19 осуществляется выбор технологического оборудования. В блоке 3.7 формулируются условия выбора оборудования: геометрия обрабатываемой поверхности; габариты детали; программа выпуска; требуемая точность обработки; требуемая шероховатость.

Далее формируется список станков, которые можно использовать на данном переходе по своим технологическим возможностям. В блоке 3.9 выбирается первый станок ($i = 1$) в блоках 3.10–3.13

осуществляется его проверка по условиям выбора. Если какое-либо условие не выполняется, проверяется наличие в базе данных непроверенных станков (блок 3.15) и выбирается следующий станок (блок 3.9). Если станок удовлетворяет всем требованиям, его номер записывается в список возможных для выбора станков (блок 3.14). Далее также проверяется наличие в базе непроверенных станков (блок 3.15). Если проверены уже все станки ($i = n$, где n – число станков в базе), то проверяется, проверяется состояние списка (блок 3.16). Если список пуст (условия выбора оборудования очень жесткие), то надо расширить условия выбора (блок 3.17). Если в списке несколько станков, то в блоке 3.18 отбирается станок по критерию обеспечения наибольшей производительности.

В блоках 3.20–3.24 осуществляется предварительный выбор ЭИ. В блоке 3.20 формулируются условия выбора ЭИ: обрабатываемый материал; требуемая точность обработки; требуемая шероховатость.

По справочным таблицам [2] определяется требуемая конструкция и материал ЭИ. Факторы выбора: выполняемая операция; площадь обработки; удаляемый припуск (сплошной металл или предварительно обработанная поверхность).

Конструкция ЭИ должна быть технологичной и не влиять на быстродействие следящего привода, а стоимость изготовления – ниже стоимости основного изделия (штампа, пресс-формы и т.д.) не менее чем в три раза.

В блоке 3.24 осуществляется выбор полярности ЭИ. Выбор полярности обусловлен необходимостью получить высокую скорость съема на заготовке и наименьший износ ЭИ.

Расчет ЭИ из-за отсутствия на данный момент необходимых данных осуществляется позже (блоки 4.21–4.27).

В блоках 4.1–4.8 производится расчет припусков на обработку. В блоке 4.1 определяются значения составляющих минимального припуска:

- R_z – высота микронеровностей поверхности (шероховатость);
- h – глубина дефектного поверхностного слоя;
- Δ_{Σ} – суммарное значение пространственных отклонений взаимосвязанных поверхностей;
- ε – погрешность установки на выполняемом переходе.

В блоке 4.2 определяются для каждого перехода расчетные величины минимального припуска

$$Z_{i \min} = R_{zi-1} + h_{i-1} + \Delta_{\Sigma i-1} + \varepsilon_i Z_{i \min}. \quad (1)$$

В блоке 4.3 определяются расчетные размеры детали по переходам. Для перехода, предшествующего конечному, определяется расчетный размер прибавлением к наименьшему предельному размеру (для внутренних поверхностей – вычитанием из наибольшего предельного размера) по чертежу расчетного минимального припуска $Z_{i \min}$. Последовательно определяются расчетные размеры для каждого предшествующего перехода при-

бавлением к расчетному размеру, следующему за ним смежного перехода (для внутренних поверхностей – вычитанием из расчетного размера), расчетного минимального припуска $Z_{i\min}$.

В блоке 4.4 определяются предельные размеры по переходам.

Наибольшие предельные размеры определяются прибавлением допуска к округленному наименьшему предельному размеру (для внутренних поверхностей – наименьшие предельные размеры вычитанием допуска из округленного наибольшего предельного размера).

В блоке 4.5 определяются максимальные и минимальные значения припусков по переходам. Предельные значения припусков Z_{\max} определяются как разность наибольших предельных размеров и Z_{\min} как разность наименьших предельных размеров предшествующего и выполняемого переходов (для внутренних поверхностей соответственно Z_{\max} определяют как разность наименьших предельных размеров, а Z_{\min} как разность наибольших предельных размеров выполняемого и предшествующего переходов).

В блоке 4.6 проверяется соотношение рассчитанного суммарного припуска на обработку и реального общего припуска $Z_{общ}$. Если общий припуск больше, то он снимается на первом черновом переходе. Припуск на получистовую и окончательную обработки в этом случае определяется по формуле (1), а припуск на черновую обработку рассчитывается по формуле (блок 4.7)

$$Z_{черн} = Z_{общ} - Z_{получист} - Z_{оконч}, \quad (2)$$

где $Z_{общ}$ – общий припуск на обработку; $Z_{получист}$ – припуск на получистовую обработку; $Z_{оконч}$ – припуск на окончательную обработку. Расчет припусков закончен (блок 4.8).

В блоках 4.9–4.20 осуществляется предварительный выбор режимов обработки для первоначальной настройки оборудования. Дальнейшая коррекция режимов обработки осуществляется непосредственно в процессе обработки системой управления станка.

В блоке 4.9 уточняются исходные данные: припуск на переход; требуемая шероховатость; геометрическая зона обрабатываемой полости; допустимый износ ЭИ.

Режимы при питании от генераторов типа ШГИ можно подразделить на три группы, отличающиеся формой импульсов разрядного тока: прямоугольную, гребенчатую и колоколообразную. В блоке 4.10 определяется тип импульса. Основные факторы выбора: материал заготовки; требуемая шероховатость; полярность ЭИ; допустимый износ ЭИ.

Обработка прямоугольными импульсами позволяет получить наибольшую для данного ГИ производительность и наименьшую шероховатость обработанной поверхности. Износ ЭИ не превышает обычного уровня при использовании графитовых ЭИ черновую обработку со сравни-

тельно малым износом осуществляют прямоугольными импульсами. Чистовую ЭЭО с использованием прямоугольных импульсов производят графитовыми ЭИ.

Применение гребенчатых импульсов резко снижает износ ЭИ при обработке на обратной полярности сталей и сплавов на никелевой основе, а также алюминиевых сплавов медными и графитовыми инструментами.

При повышенных требованиях к точности чистовую ЭЭО выполняют металлическими ЭИ (медь, латунь и т.д.) с использованием импульсов гребенчатой формы.

При сочетании высокой точности размеров с повышении требованиями к шероховатости обработанной поверхности чистовая ЭЭО осуществляется сначала с использованием импульсов гребенчатой формы последовательно на частотах 22; 44; 88 и 200 кГц, а затем с применением прямоугольных импульсов на частотах 88...440 кГц. При работе металлическими ЭИ без орбитальных движений чистовую ЭЭО с использованием гребенчатых импульсов начинают с частоты 44 кГц.

В блоке 4.14 определяются параметры, связанные с рабочей жидкостью: расход и давление жидкости.

Расход q или давление p рабочей жидкости устанавливают в зависимости от величины рабочего тока (с увеличением тока необходимо увеличивать расход жидкости, чтобы обеспечить удаление продуктов эрозии и теплообмен) и допустимого износа инструмента (с увеличением скорости прокачиваемой жидкости износ увеличивается).

На практике при оптимизации условий прокачки РЖ для чистовых и доводочных режимов можно пользоваться скоростью ее потока, полученной экспериментально (для графитовых ЭИ 0,003–0,8 м/с, для медных – 0,03–0,2 м/с).

Расход q или давление p рабочей жидкости устанавливают в зависимости от величины рабочего тока (с увеличением тока необходимо увеличивать расход жидкости, чтобы обеспечить удаление продуктов эрозии и теплообмен) и допустимого износа инструмента (с увеличением скорости прокачиваемой жидкости износ увеличивается).

Объемный расход жидкости, обусловленный самим процессом, составляет при этом для энергии импульсов $W_e = 0,045–1,5$ Дж соответственно 0,12–0,27 см³/с.

Поскольку расход жидкости влияет на износ инструмента, величину q определяют из условия допустимого линейного износа инструмента $V_{l\max}$ и проверяется затем по условиям теплообмена в межэлектродной полости и эвакуации частиц

$$q = J^{1/3} [(kP/a_2)(\vartheta_{l\max} - \vartheta_{l0})]^{2/3}, \quad (3)$$

где P – параметр проходного сечения; $\vartheta_{l0} = (0,2–1,0)\%$ для электродов сталь[–] – медь⁺ и $f_p = 8–200$ кГц. При обработке стали медными инструментами и использовании прямоугольных импульсов, а

также при применении углеграфитовых инструментов расход должен быть в 2-2,5 раза больше.

В блоке 4.15 предварительно определяется величина МЭП. Величина МЭП устанавливается стадией пробоя для всех процессов после разряда. В итоге данной стадией определяются точность обработки и условия удаления продуктов из МЭП, а значит и производительность.

Модель минимального зазора $S_{F\min}$, определяемого режимом обработки, можно упростить до следующей формулы:

$$S_{F\min} = k \sqrt{J/q}, \quad (4)$$

где $J = 4-80$ А; $q = 0,2-40$ см³/с; $k \approx (1,8-3)10^{-3}$ в зависимости от формы импульса.

Каждой площади обработки S соответствует своя оптимальная мощность W_{\max} (или ток), обеспечивающая наибольшую производительность:

$$W_{\max} \approx k_P S^n, \quad (5)$$

где k_P и n зависят от условий обработки.

При переходе к чистовым и получистовым режимам, характеризуемым высокими частотами импульсов и малыми энергиями, площадь, оптимальная по максимуму производительности, уменьшается, что объясняется ухудшением условий выведения из МЭП продуктов эрозии. Выбор оптимального режима обработки см. в блоке 4.18. Электрический режим выбран правильно, если скорость вертикального перемещения ЭИ в процессе обработки 0,2...0,4 мм/мин. При увеличении площади обработки более значений, соответствующих $I_{cp} = 65\dots 70$ А, обработку производят при максимальной производительности, но при пониженной скорости движения ЭИ.

Так как по мере заглубления ЭИ в обрабатываемую полость площадь обработки может меняться, то величина средней площади обработки должна пересчитываться через каждые 2-3 мм вертикального перемещения (блок 4.20) и режимы соответственно уточняются.

В блоках 4.21-4.27 производится расчет размеров ЭИ. В блоке 4.22 уточняются величины МЭП и припуска на последующую обработку.

Величину МЭП можно выбрать по таблицам. Припуск рассчитан ранее. Тогда, например,名义ный размер ЭИ для ЭЭПр отверстий круглого или квадратного поперечного сечения $B = A - 2(\delta + Z_{\delta\min})$, где A – размер обрабатываемого элемента детали по чертежу; δ – МЭП; $Z_{\delta\min}$ – припуск на последующую обработку.

По формулам [2] в зависимости от серийности производства в блоке 4.28 определяется потребность в спроектированном ЭИ. Расчет заканчивается определением основного (машинного) и штучного времени на операцию (блок 4.29).

Основное время обработки на переход с учетом времени разведения электродов при релаксациях (или вибрации) составляет

$$t_{och} = \sum_{i=1}^N N \Delta_i A_i \left(1 + t_{01}^* / t_{p1}^* \right) / I_i V_{WI}, \quad (6)$$

где N – число режимов обработки; Δ_i – припуск, снимаемый на i -м режиме; t_{01}^* – время разведения электродов при релаксации; t_{p1}^* – время работы между двумя последовательными разведениями.

Основное время на операцию определяется суммированием основного времени по переходам. В серийном производстве на операцию рассчитывается штучно-калькуляционное время:

$$t_{um-k} = t_{um} + \frac{T_{n.z.}}{n}, \quad (7)$$

где t_{um} – штучное время на операцию; $T_{n.z.}$ – подготовительно-заключительное время; n – размер партии запуска деталей, $n = N_{год}/S$, где $N_{год}$ – годовой выпуск деталей, S – число запусков в год (4, 6, 12, 24, для среднесерийного $S = 12$).

В практике для расчета штучного времени обычно используют формулу

$$t_{um} = (t_o + t_{bcn}) \left(1 + \frac{\alpha}{100} \right), \quad (8)$$

α – процент потерь оперативного времени, учитывающий остальные составляющие ($\alpha = 5-7\%$).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Разработка и управление ходом технологического процесса электроэррозионной обработки / В. А. Полетаев, И. С. Сыркин // Вестн. Кузбасского гос. тех. унив., 2007. № 1. – С. 60-66.
2. Полетаев, В. А. Проектирование технологии электроэррозионной обработки / В. А. Полетаев, А. Н. Трусов; ГУ КузГТУ. – Кемерово, 2008. – 169 с.
3. Электроэррозионная обработка металлов / М. К. Мацкевич, А. И. Бушник, И. А. Бакуто и др. – Минск: Наука и техника, 1988. – 216 с.

□ Авторы статьи:

Полетаев

Вадим Алексеевич

– докт.техн.наук, проф., зав.

каф."Информационные и автоматизированные производственные системы" КузГТУ

Тел.8-3842-58-08-11

Трусов

Александр Николаевич

– канд.техн.наук , доц. каф. "Информационные и автоматизированные производственные системы" КузГТУ.

Тел.8-3842-58-08-11