М 179515

НА ДОМ НЕ ВЫДАЕТСЯ

Министерство высшего и среднего специального образования

Московское
ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени
высшее техническое училище имени Н. Э. Баумана

В. Е. АВРАМЕНКО

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОИСКРОВОЙ ОБРАБОТКИ НЕПРОФИЛИРОВАННЫМ ЭЛЕКТРОДОМ В МАШИНОСТРОЕНИИ

Диссертация написана на русском языке
(Специальность 05.164—«Технология машиностроения»)

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва 1972

Работа выполнена на кафедре «Технология механосборочного производства» МВТУ им. Н. Э. Баумана.

Научный руководитель —
канд. техн. наук, доцент Калинин М. А.

Официальные оппоненты:
заслуженный деятель науки и техники РСФСР,
доктор техн. наук, профессор Малов А. Н.,
канд. техн. наук, доцент Глазков А. В.

Ведущее предприятие указано в решении Ученого Совета.

Автореферат разослан « 6 » XII 1972 г.

Защита диссертации состоится « » I-II 1973 г.
на заседании Совета факультета «Автоматизация и механи-
зация пр... Ленина и ордена
Трудо... ческого училища
им. ... 05, 2-я Бауман-
ская...

...енные печатью,
про...

...блиотеке МВТУ
име...

...Степанов Ю. А.

№ 17 9515

Л-89 ... З. 2729. Т. 150

ВВЕДЕНИЕ

Одним из перспективных путей развития машиностроения является широкое внедрение в производство прогрессивных технологических процессов, в том числе электрофизических методов размерной обработки. Эффективным способом изготовления деталей сложной конфигурации является электроискровая обработка непрофилированным электродом-проволокой. Технологические возможности метода делают его в ряде случаев единственно приемлемым при обработке большого класса сложнопрофильных деталей из труднообрабатываемых материалов, а также из углеродистых и легированных сталей в закаленном состоянии.

Широкое применение данного метода в машиностроении сдерживается рядом теоретических, технологических и практических проблем. К их числу относится, прежде всего, недостаточный уровень теоретической изученности физической сущности механизма электрической эрозии и отсутствие его детерминистических моделей. Имеющиеся в настоящее время качественные теории описывают лишь отдельные элементы этого механизма и не позволяют решить в короткий срок на их основе все технологические задачи, связанные с эффективным использованием метода. Отсутствие эффективных формализованных методик расчета технологических характеристик обработки и выбора ее оптимальных условий компенсируются наладочными работами на производстве, при этом наладка станка в конкретных случаях обработки превращается в эксперимент, связанный с определением необходимых исходных данных для выполнения операции.

М 179575

В целях повышения эффективности электроискровой обработки непрофилированным электродом и расширения области ее применения в машиностроении в работе были поставлены следующие задачи:

1. Повышение стабильности и технологической надежности процесса электроискровой обработки непрофилированным электродом легированных и углеродистых сталей в закаленном состоянии.

2. Математическое описание взаимосвязей технологических характеристик с управляющими факторами процесса и разработка методик выбора его оптимальных условий.

3. Исследование влияния технологических факторов на качество обработки непрофилированным электродом – точность, чистоту получаемой поверхности и состояние поверхностного слоя –

НТБ МГТУ им.Н.Э.Баумана

с целью оценки технологических возможностей метода и разработки мероприятий по их им повышению.

Глава I. ПОВЫШЕНИЕ СТАБИЛЬНОСТИ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ НАДЕЖНОСТИ ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОИСКРОВОЙ ОБРАБОТКИ НЕПРОФИЛИРОВАННЫМ ЭЛЕКТРОДОМ

Технологические характеристики электроискровой обработки непрофилированным электродом в значительной степени определяются стабильностью процесса эрозии, т.е. условием его непрерывного протекания с установленными значениями управляющих параметров.

Нарушениями стабильного протекания процесса являются неустранимые короткие замыкания электрода-проволоки с продуктами эрозии, осевшими на стенках паза, прорезаемого электродом-проволокой и "сбои" в рабочем цикле релаксационного (RC) и транзисторного (ТГ-130/15) генераторов импульсов, возникающие вследствие коротких замыканий через частицы эрозии и смещений электрода-проволоки.

Как показали проведенные исследования, эффективным путем повышения стабильности электроискрового процесса является использование в качестве межэлектродной среды деионизованной воды, получаемой с помощью специальной установки, обеспечивающей контроль и постоянство ее свойств. Эффект от использования данной рабочей среды достигается за счет повышения скорости деионизации межэлектродного промежутка, отсутствия твердых продуктов разложения среды и интенсификации условий эвакуации продуктов эрозии. Высокая степень очистки паза j =70-90% полностью исключает возникновение неустранимых коротких замыканий электрода-проволоки с обрабатываемой деталью.

Анализ результатов осциллографирования процесса показывает, что использование в качестве межэлектродной среды деионизованной воды, подаваемой поливом в зону обработки, позволяет значительно улучшить все показатели стабильности и электрические параметры процессы (таблица I).

Постоянная смена рабочей среды с удельным сопротивлением ρ_t =3-5момсм обеспечивает стабильные условия в межэлектродном промежутке, и тем самым, сокращает разброс электрических параметров процесса и определяемых ими технологических характеристик обработки.

МВТУ им. Н. Э. Баумана БИБЛИОТЕКА

ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ

Предложенная конструкция направляющего устройства для электрода-проволоки исключает ее случайные смещения в процессе обработки и возникающие вследствие этого "сбои" в работе следящей системы станка.

Таблица I

Параметры процесса (генератор RC, ХI2М-Л62, C=0,5мкф, Jкз=I,2а, Uхх=I80в)	Межэлектродная среда	
	керосин	деионизованная вода
Относительная частота коротких замыканий, $p_{кз}$	0,25	0,05
Относительная частота холостых ходов, $p_{хх}$	0,I5	0,05
Относительная частота импульсов искаженной формы, $p_{и}$	0,30	0,I5
Длительность рабочего цикла генератора, Тц, мксек	300	I55
Коэффициент рабочего времени цикла, ζ %	I,5	4,5

Стабилизация процесса эрозии позволила обеспечить высокую воспроизводимость результатов экспериментов, надежное достижение заданных технологических характеристик обработки и выполнение практических предпосылок для разработки их математических моделей.

Глава П. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ЗАВИСИМОСТЕЙ ЭЛЕКТРОИСКРОВОЙ ОБРАБОТКИ НЕПРОФИЛИРОВАННЫМ ЭЛЕКТРОДОМ

Отсутствие детерминистических моделей механизма электрической эрозии и статистический характер формирования выходных параметров обработки ставят задачу количественного представления технологических зависимостей и оптимизации на основе современных математических методов и предпосылки о возможности оптимального управления при неполном знании механизма процесса.

Анализ результатов проведенного однофакторного эксперимента и имеющихся технологических исследований позволяет представить процесс электроискровой обработки непрофилированным

электродом в виде математической схемы, основными элементами которой являются: регулируемые управляющие факторы процесса $\{X\} = (X_1, X_2, X_3, \dots X_n)$, управляющие нерегулируемые факторы $\{Z\} = (z_1, z_2, z_3, \dots z_n)$, неконтролируемые переменные $\{W\} = (w_1, w_2, \dots w_n)$ выходные технологические параметры процесса $\{Y\} = (y_1, y_2, y_3, \dots y_n)$. С технологической точки зрения наибольший практический интерес представляют уравнения связи выходных параметров процесса с его управляющими и регулируемыми факторами:

$$\bar{Y} = F(\bar{\theta}, \bar{X}),$$

где F – оператор, символизирующий процесс,

$\bar{\theta}$ – вектор неизвестных параметров модели.

В этом случае, при известной структуре оператора F, задача разработки математической модели выходного параметра сводится к отысканию вектора параметров модели $\bar{\theta}$, информацию о котором несет вектор выходных параметров $\bar{Y}$.

Предварительный выбор доминирующих факторов, ответственных за технологические характеристики обработки и подлежащих включению в разрабатываемые математические модели, проведенные по результатам однофакторного исследования, был уточнен с помощью специального отсеивающего эксперимента с использованием метода случайного баланса. В программу отсеивающего эксперимента были включены следующие факторы: X_1 – емкость конденсаторов (C), X_2 – ток короткого замыкания ($J_{кз}$), X_3 – напряжение холостого хода ($U_{хх}$), X_4 – толщина обрабатываемой детали ($t_д$), X_5 – диаметр электрода ($D_э$), X_6 – скорость перемотки электрода ($V_п$), X_7 – натяжение электрода ($P_н$), X_8 – удельное сопротивление межэлектродной среды (ρ).

Результатами отсеивающего эксперимента установлено, что в принятых интервалах варьирования доминирующее влияние на производительность обработки оказывают факторы: X_1, X_2, X_3, X_4. Значимым оказался ряд эффектов взаимодействия: X_1, X_2, X_2X_3, X_1X_3, что хорошо согласуется с качественными выводами, полученными из однофакторного эксперимента.

При исследовании шероховатости методом случайного баланса картина выделенных эффектов оказалась еще более характерной: небольшое число значимых эффектов (X_1, X_2, X_3, X_1X_2) на фоне незначимых и ошибки опыта и большая крутизна спада между ними.

Исходя из качественного характера частных зависимостей, полученных в однофакторном исследовании и результатов отсеива-

ющего эксперимента, в настоящей работе в качестве математического вида аппроксимирующего выражения используются степенные полиномы, структура которых позволяет отразить степень нелинейности по каждому фактору и имеющиеся эффекты их взаимодействия:

$$E[Y(X)] = f^*(x)\beta = \sum_{i=1}^{k} f_i(X)\beta_i = \beta_0 + \sum_{i=1}^{k}\beta_i X_i + \sum_{i<j}\beta_{ij} X_i X_j + \sum_{i=1}^{k}\beta_{ii} X_i^2 ,$$

где $Y(x)$ – измеренное значение выходного параметра;

$\beta_0, \beta_i, \beta_{ij}, \beta_{ii}$ – параметры модели (теоретические коэффициенты регрессии);

$f_i(X)$ – вектор-функция, заданная полиномом второй степени.

Реализация квази-Д-оптимальных экспериментальных планов типа B_K, в наибольшей степени отвечающих задаче получения оценок параметров моделей, позволила получить ряд математических моделей выходных технологических характеристик обработки непрофилированным электродом в виде уравнений регрессии второго порядка. В частности, модели шероховатости (Y_{Ra}) и производительности обработки (Y_{Qa}) для стали ХВГМ имеют следующий вид:

$$Y_{Qa}(\text{ХВГМ}) = 5{,}890 + 1{,}053X_1 + 2{,}374X_2 + 0{,}772X_3 - 0{,}398X_4 + 0{,}105X_1^2 - 1{,}270X_2^2 + 0{,}180X_3^2 + 0{,}350X_4^2 + 1{,}228X_1X_2 + 0{,}429X_2X_3; \quad (1)$$

$$(F_{\text{расч.}} = 3{,}2;\ F_{\text{табл. }0{,}01}(9{,}24) = 3{,}3)$$

$$Y_{Ra}(\text{ХВГМ}) = 2{,}188 + 0{,}336X_1 + 0{,}602X_2 + 0{,}197X_3 + 0{,}100X_1^2 - 0{,}230X_2^2 + 0{,}216X_1X_2 + 0{,}055X_2X_3; \quad (2)$$

$$(F_{\text{расч.}} = 1{,}02;\ F_{\text{табл. }0{,}01}(9{,}24) = 3{,}3)$$

где $X_1 = \frac{I - 0{,}5}{0{,}3}$; $X_2 = \frac{T_{\text{кз}} - 1{,}15}{0{,}65}$; $X_3 = \frac{U_{\text{хх}} - 135}{15}$; $X_4 = \frac{t_{\text{и}} - 15}{10}$;

Полученные математические модели наглядно представляют характер влияния управляющих факторов электроискрового процесса на его выходные параметры. В частности, значимые эффекты взаимодействия тока короткого замыкания с емкостью (X_1X_2) и напряжением (X_2X_3) отражают формирующее воздействие комбинаций этих факторов (при работе с генераторами RC и ТГ-130/15) на частоту, длительность и энергию рабочих импульсов, в конечном итоге определяющие выходные параметры обработки.

Значимость квадратичных эффектов и эффектов взаимодействия X_1X_2 и X_2X_3 соответствует качественным выводам, полученным на основе однофакторного эксперимента и подтверждают правильность сделанного выбора математического вида аппроксимирующего выражения.

Полученные модели адекватны с 99%-ным уровнем достоверности. Максимальные погрешности расчетных значений выходных параметров находятся в пределах 5-7%.

Проведенное математическое описание является необходимой основой для разработки методик проектирования операции электроискровой обработки непрофилированным электродом и выбора ее оптимальных условий.

Глава Ш. ВЫБОР ОПТИМАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ ЭЛЕКТРОИСРОВОЙ ОБРАБОТКИ НЕПРОФИЛИРОВАННЫМ ЭЛЕКТРОДОМ

При наличии адекватных математических моделей технологических параметров электроискровой обработки, задачи выбора ее оптимальных условий сводится к расчету и может быть сформулирована как задача на условный экстремум: определение комбинаций управляющих факторов процесса, обеспечивающих максимальную производительность при ограничениях, накладываемых заданной шероховатостью и допустимыми интервалами варьирования факторов.

Для каждого уровня шероховатости, входящего в диапазон возможностей обработки непрофилированным электродом, задача состояла в определении координат точки $X^*=(X_1^*X_2^*,\ldots X_n^*)$, в которой достигается максимум целевой функции:

$$Y_{Q_0}(X^*) = \max Y_{Q_0}(X) \qquad (3)$$

при ограничениях вида: $Y_{R_0} \leqslant A_j$; $(j=1,2,3,\ldots m)$

$$\alpha_n \leqslant X_n \leqslant \beta_n \qquad (4)$$

где A_j – константы (уровни шероховатости R_0 , мкм),

X_n – независимые переменные.

По результатам канонического анализа моделей шероховатости и производительности обработки соответствующие им поверхности отклика являются поверхностями минимаксного типа с центрами вне области эксперимента. В этих условиях наибольшая вычислительная простота, надежность и минимальная длительность решения обеспечивается использованием алгоритма случайного поиска.

В качестве целевой функции (3) и функции ограничений (4) при решении задачи использовались полиномиальные модели производительности Y_{Q_0}(I) и шероховатости обработанной поверхности Y_{R_0} (2).

Задача аналитического выбора оптимальных условий обработки решена на ЭВМ"Минск-22".Проведенная геометрическая интерпре-

тация математических моделей технологических параметров и исследование соответствующих им поверхностей отклика путем построения двухмерных сечений плоскостями $X_3=-1(U_{xx}=120в)$, $X_3=0(U_{xx}=135в)$, $X_3=+1(U_{xx}=150в)$ содержат количественную информацию о распределении выходных технологических параметров в факторном пространстве и могут быть использованы для приближенного графоаналитического выбора оптимальных условий обработки.

Для случаев, когда разработка подробных математических моделей технологических параметров является нецелесообразной, в работе предложена методика экспериментального поиска оптимальных условий обработки, основанная на последовательном симплексном планировании экспериментов.

Глава IУ. ИССЛЕДОВАНИЕ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ТОЧНОСТЬ ЭЛЕКТРОИСКРОВОЙ ОБРАБОТКИ НЕПРОФИЛИРОВАННЫМ ЭЛЕКТРОДОМ

Точность обработки непрофилированным электродом сложнопрофильной поверхности характеризуется погрешностями ее размеров, формы и расположения относительно базовых поверхностей детали.

В качестве метода исследования и оценки точности в настоящей работе был выбран расчетно-аналитический метод, предусматривающий дифференцированное исследование факторов, вызывающих образование первичных погрешностей и определение суммарной погрешности обработки.

Основными технологическими факторами, влияющими на точность обработки непрофилированным электродом по копиру являются: нестабильность межэлектродного зазора, износ электрода-проволоки, нестабильность ее положения и неточность выверки, геометрические неточности технологической системы, тепловые деформации детали и копира и качество его изготовления.

Доминирующим фактором, отражающим влияние электроискрового процесса на точность обработки, является нестабильность межэлектродного зазора. Погрешности размеров обрабатываемого профиля, обусловленные межэлектродным зазором ($\Delta_3 A$), определяются величиной и знаком разности его расчетного и действительного значений в данной точке профиля, а погрешность формы ($\Delta\Phi_3$) – разностью предельных значений зазора, зависящей от неоднородности свойств материала заготовки, колебаний режима обработки

и нестабильности условий в межэлектродном промежутке.

Рассматривая межэлектродный зазор как один из выходов многофакторной системы, представляющей процесс эрозии, методами активного эксперимента в работе получены регрессионные модели зазора, устанавливающие его связь с основными управляющими факторами процесса.

Из полученных зависимостей для расчета $\Delta_3 A$ и $\Delta\Phi_3$ следует, что погрешности, вносимые межэлектродным зазором определяются точностью его расчета и величиной поля рассеяния значений зазора в пределах обрабатываемого профиля. Стабилизация условий электроискрового процесса за счет мероприятий, изложенных в гл. I, позволяет в I,5-2 раза сократить поле рассеяния величин зазоров, а полученные математические модели межэлектродного зазора - свести к минимуму погрешности, обусловленные неточностью его расчета: средняя для узлов аппроксимации относительная погрешность расчетных значений зазора составляет I,5%.

Погрешность формы профиля в вертикальной плоскости определяется износом электрода-проволоки. Параметры износа электрода являются функцией электрического режима обработки и статистических закономерностей распределения разрядов по фронту взаимодействия электродов. Математическое описание взаимосвязи параметров износа с определяющими их факторами в работе получено на основе многофакторного эксперимента, проведенного в соответствии со схемой почти-Д-оптимального экспериментального плана типа B_4. Разработаны математические модели объемного износа электрода-проволоки, площади его поперечного сечения на выходе из детали и линейного износа в направлении, перпендикулярном рабочей подаче.

На основе моделей параметров износа электрода-проволоки в работе получены зависимости для расчета режима ее перемотки, обеспечивающего надежное протекание процесса, и погрешностей, вносимых износом.

Изменение теплового режима в процессе обработки является причиной деформаций элементов технологической системы, влияющих на точность обработки. Исследование температурного поля вырезного станка мод.453I производилось на различных режимах обработки и на "холостом" ходу с одновременной регистрацией относительных деформаций стола станка и скобы с электродом-инструментом.

Исследование проводилось при обработке в двух средах- непроточном керосине и деионизованной воде, подаваемой поливом в зону обработки.

При известных температурных полях, относительные деформации скобы и стола могут быть приближенно оценены с помощью зависимостей, полученных на основе размерных цепей технологической системы.

Относительные деформации скобы и стола станка оказывают влияние на точность при обработке узких пазов и прямолинейных контуров, а также при использовании систем ПУ. При обработке по копиру составляющая суммарной погрешности Δ_T, обусловленная тепловыми деформациями, определяется различием в коэффициентах линейного расширения и избыточных температурах копира и заготовки, т.е. разностью их деформаций. В работе приведены зависимости для расчета погрешностей размеров и формы профиля, обусловленных тепловыми деформациями. Показано, что использование непрерывной подачи рабочей среды позволяет значительно снизить погрешности, вызванные тепловыми деформациями, по сравнению с обработкой в непроточном керосине. При максимальных избыточных температурах и размерах профиля погрешности его линейных размеров и формы при обработке в проточной деионизованной воде составляют: $\Delta_{T\,max} = 5{,}6$мкм и $\Delta\Phi_{T\,max} = 1{,}5$ мкм.

Конструктивно-технологическим фактором, влияющим на точность обработки, является нестабильность положения электрода-проволоки, вызванная его колебаниями в процессе перемотки и смещениями в направляющем устройстве. При обработке электродом-проволокой с диаметрами $D_{эл} = 0{,}15$–$0{,}3$мм, допускающими усилия натяжения $P_н = 2000$–15000мн, доминирующее воздействие на точность оказывают случайные смещения электрода в направляющем устройстве. Результаты проведенных экспериментов показывают, что при использовании направляющего устройства предложенной конструкции смещения электрода в диапазонах расстояний между его опорами $L_0 = 20$–100мм и $P_н = 2000$–15000мн составляет 0,002–0,004мм.

В работе приведены зависимости для расчета погрешностей обработки, вызванных нестабильностью положения электрода-инструмента ($\Delta_г$) и неточностью его выверки относительно баз обрабатываемой детали ($\Delta_{из}$).

Рассматривая приведенные выше первичные погрешности как вектора с началом на номинальной поверхности, суммарную погреш-

ность нормальных размеров профиля, обусловленную процессом обработки, можно представить алгебраической суммой:

$$\bar{\Delta}_{\Sigma} = \bar{\Delta}_{з} + \bar{\Delta}T + \bar{\Delta}_{с} + \bar{\Delta}_{сс} ,$$

где $\Delta_{з}$ – погрешности нормальных размеров профиля, обусловленные нестабильностью межэлектродного зазора;

ΔT – тепловыми деформациями копира и заготовки;

$\Delta_{с}$ – нестабильностью положения электрода-инструмента;

$\Delta_{сс}$ – работой следящей системы станка.

С учетом погрешностей, вносимых установкой электрода – $\Delta_{пз}$ и неточностей изготовления копира – $\Delta_{коп}$, суммарная погрешность нормальных размеров профиля при обработке по копиру будет равна:

$$\bar{\Delta}_{дет} = \bar{\Delta}_{\Sigma} + \bar{\Delta}_{пз} + \bar{\Delta}_{коп}$$

Суммарная погрешность, связанная с процессом обработки, может изменяться в пределах профиля от $\Delta_{\Sigma min}$ до $\Delta_{\Sigma max}$ и иметь оба знака. В работе рассмотрены возможные случаи расположения погрешностей Δ_{Σ} относительно номинальных размеров профиля и приведены соответствующие им зависимости для расчета погрешностей формы профиля, обусловленных процессом обработки.

Суммарная погрешность формы обрабатываемого профиля в плоскости расположения копира определяется суммой:

$$\Delta\Phi_{г} = \Delta\Phi_{пр} + \Delta\Phi_{пз} + \delta_{к} ,$$

где $\Delta\Phi_{пр} = \Delta\Phi_{з} + \Delta\Phi_{т} + \Delta\Phi_{с} + \Delta\Phi_{сс}$ – часть суммарной погрешности формы, обусловленная приведенными выше факторами, связанными с процессом обработки;

$\Delta\Phi_{пз}$ – погрешность формы профиля, обусловленная неточностью выверки (перекосом электрода);

$\delta_{к}$ – допуск на изготовление копира.

В работе приводятся зависимости для расчета размеров копира и допуска на его изготовление с учетом погрешностей, вносимых процессом обработки. Дан порядок проектирования операции электроискровой обработки непрофилированным электродом, основанный на полученных результатах работы.

По данным экспериментальной проверки методики определения суммарной погрешности обработки, проведенной путем обработки отверстий по копиру, максимальные отклонения расчетных значений погрешностей от экспериментальных не превышают 14%.

Анализ структуры суммарной погрешности обработки показал, что наибольший удельный вес имеют ее составляющие, обусловлен-

ные нестабильностью межэлектродного зазора (до 35% суммарной погрешности), тепловыми деформациями заготовки и копира (до 25%), нестабильностью положения электрода-проволоки (до 15%) и вносимые работой следящей системы станка (до 10%).

Проведенное исследование технологических факторов, вызывающих образование первичных погрешностей, позволило разработать ряд практических мероприятий, направленных на повышение точности электроискровой обработки непрофилированным электродом.

Глава У. ИССЛЕДОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ, ОБРАЗОВАННОГО ОБРАБОТКОЙ НЕПРОФИЛИРОВАННЫМ ЭЛЕКТРОДОМ

Проблема повышения надежности и долговечности деталей, обрабатываемых непрофилированным электродом, и определение технологических возможностей метода в машиностроении ставят ряд задач исследования формируемого им поверхностного слоя:

- исследование влияния режима обработки и свойств межэлектродных сред на структуру и фазовый состав поверхностного слоя легированных и углеродистых сталей;
- анализ напряженного состояния поверхностного слоя;
- разработка методик расчета глубины измененного слоя и припуска на последующую обработку.

Исследование состояния поверхностного слоя в данной работе проводилось с помощью микроанализа и послойного рентгенографического фазового анализа. Рентгенографирование производилось с плоской поверхности образцов с регистрацией дифрагированного излучения фотографическим и ионизационным методами. Материалом исследования являлись образцы из закаленных сталей Х12М, ХВГ и У10А (HRC55-60), обработанные непрофилированным электродом в керосине и деионизованной воде.

По данным металлографического исследования, зона термического влияния разрядов в сталях Х12М, ХВГ и У10А состоит из нескольких различных по структуре слоев:

- белого нетравящегося слоя оплавленного металла;
- участков вторичной закалки;
- темнотравящегося слоя со структурой отпуска;
- исходной мартенситной структуры.

При обработке на жестких режимах (C =1,5мкф, $J_{кз}$ =1,5а, $U_{хх}$= 130в) поверхностный слой получается наиболее неоднородно-

го строения, при этом имеет место чередование нескольких слоев вторичной закалки и отпуска.

Рентгенографическим фазовым анализом установлено характерное для всех исследованных материалов возрастание количества остаточного аустенита от исходного материала к обработанной поверхности. Для "предельных" режимов обработки в деионизованной воде:

I. C =0,2мкф, $J_{кз}$ = 0,5а, $U_{хх}$ = 120 в

II. C =2,0мкф, $J_{кз}$ = 2,0а, $U_{хх}$ = 150 в

максимальное содержание остаточного аустенита в поверхностном слое стали Х12М составляет: $P_{\gamma I\,max}$=45% и $P_{\gamma II\,max}$ = 78%.

Меньшее по сравнению со сталью Х12М содержание остаточного аустенита в поверхностных слоях сталей ХВГ ($P_{\gamma II max}$= 38%) и У10А ($P_{\gamma II max}$ = 33%) объясняется большей степенью завершенности вторичных термических процессов, зависящих от свойств межэлектродных сред и обрабатываемых материалов.

Рентгенографическим фазовым анализом выделенного из поверхностного слоя порошка с удаленными доминирующими фазами установлено образование карбидов (M_7C_3 -$(Fe,Cr,Mo)C_3$ - в поверхностном слое стали Х12М и $Cr_{23}C_6$- ХВГ) и окислов Fe_3O_4 ($FeCr_2O_4$), являющихся результатом взаимодействия железа и легирующих элементов с межэлектродной средой.

Фазовые изменения в поверхностном слое вызывают снижение его микротвердости, составляющее 20-30% для наиболее "жесткого" из исследованных режимов (режим II). Исследование остаточных напряжение в поверхностном слое проводилось на плоских образцах из стали ХВГ (HRC 55-60) методом академика Н.Н.Давиденкова. Остаточные напряжения определялись по модулю упругости и деформациям пластин в процессе травления поверхностного слоя. Анализом напряженного состояния поверхностного слоя выявлено образование в нем значительных растягивающих напряжений с максимумом, расположенным на обработанной поверхности и находящимся в пределах $\sigma_{0\,max}$=55-88 кг/мм^2 (для диапазона, ограниченного режимами I,II).

Глубина фазовых изменений и распространения остаточных напряжений при обработке в керосине для указанного диапазона режимов составляет 0,01-0,1мм. Использование в качестве межэлектродной среды деионизованной воды позволяет в 2-2,5 раза по сравнению с обработкой в керосине снизить глубину измененного слоя. В случаях, исключающих возможность доводки профиля, допу-

стимо использование обработки непрофилированным электродом на режимах со значениямифакторов, не превышающими: $C < 0{,}2$ мкф, $J_{кз} < 0{,}5$а и $U_{xx} < 120$в в качестве окончательного метода обработки.

На основе результатов послойного рентгенографического фазового анализа поверхностного слоя образцов, обработанных в соответствии с ортогональным экспериментальным планом получено математическое описание взаимосвязи глубины измененого слоя с управляющими факторами процесса. Полученные зависимости позволяют дать точную оценку глубины измененого слоя в зависимости от режима обработки и назначить рациональный припуск на доводку.

Глава УI. ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ И ВНЕДРЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ В ПРОИЗВОДСТВО

Технико-экономическое обоснование технологического процесса электроискровой обработки непрофилированным электродом в деионизованной межэлектродной среде, получаемой с помощью специальной установки, производилось путем сопоставления с существующим процессом обработки в непроточном керосине.

Результаты проведенного анализа показывают, что несмотря на дополнительные затраты, связанные с изготовлением и эксплуатацией установки для получения межэлектродной среды, использование разработанного технологического процесса и обработка на оптимальных режимах позволяют снизить суммарную себестоимость обработки в 2-2,4 раза по сравнению с существующим процессом. Снижение общей трудоемкости и себестоимости обработки заданного профиля обеспечивается за счет повышения производительности электроискрового процесса, улучшения качества обработанной поверхности и уменьшения глубины измененного слоя, позволяющих значительно сократить трудоемкость слесарной доводки профиля.

Повышение надежности процесса электроискровой обработки непрофилированным электродом позволяет полностью устранить потери, вызванные браком обрабатываемой детали вследствие неустранимых коротких замыканий.

Внедрение результатов работы осуществлялось в штампо-механическом цехе автозавода им.Лихачева. Объектами внедрения являлись сложнопрофильные детали из легированных и углеродистых сталей.

В процессе внедрения результатов работы была спроектирована и изготовлена установка для получения, контроля свойств и подачи межэлектродной среды и разработаны руководящие материалы по использованию электроискровой обработки непрофилированным электродом в проточной деионизованной воде, выбору оптимальных условий обработки и проектированию операции электроискровой обработки непрофилированным электродом.

По данным автозавода им.Лихачева годовая экономия от внедренных мероприятий составляет 2500-3000 руб. на единицу оборудования. Техническая документация передана для внедрения результатов работы ряду предприятий машиностроительной промышленности.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

I. Методами оптимального планирования экспериментов получено математическое количественное описание взаимосвязи технологических характеристик электроискровой обработки непрофилированным электродом с основными управляющими факторами процесса.

2. При отсутствии детерминистических моделей процесса эрозии математический аппарат оптимального планирования экспериментов в сочетании с другими вычислительными методами является эффективным средством исследования, математического описания и оптимизации электроискровой обработки непрофилированным электродом.

3. На основе полученных математических моделей технологических параметров решена с помощью ЭВМ задача выбора оптимальных условий обработки.

4. Разработана методика экспериментального поиска оптимальных условий электроискрового процесса при отсутствии его математического описания.

5. Исследованием факторов, влияющих на точность обработки, установлено, что основными путями снижения величин погрешностей достигаемых размеров и формы профиля являются:

а) рациональное назначение номинальных размеров копира;

б) стабилизация условий в межэлектродном промежутке и теплового режима технологической системы за счет использования проточной межэлектродной среды с постоянными свойствами;

в) стабилизация положения электрода-проволоки.

6. Реализация мероприятий, направленных на снижение составляющих суммарной погрешности, позволили снизить погрешность, обусловленную процессом эрозии на 20-30%.

7. Разработана методика расчета суммарной погрешности обработки, коррекции размеров копира и назначения рационального допуска на его изготовление с учетом погрешностей, вносимых процессом эрозии.

8. Исследованием качества обработанной поверхности установлено, что обработка непрофилированным электродом обеспечивает шероховатость поверхности при обработке легированных и углеродистых сталей в пределах 5-8 класса, вызывает образование растягивающих остаточных напряжений, а также структурные и фазовые изменения исходного материала, зависящие от режима обработки и используемой межэлектродной среды. Разработаны математические модели шероховатости и глубины измененного слоя, позволяющие назначить рациональный припуск на доводку профиля.

9. Установлены диапазоны режимов, допускающих использование обработки непрофилированным электродом в качестве окончательного метода обработки.

10. Расширена область применения метода в машиностроении путем повышения надежности, качества и производительности процесса обработки сложнопрофильных деталей из легированных и углеродистых сталей в проточной межэлектродной среде с оптимальными и поддерживаемыми в допустимых интервалах свойствами.

11. Разработана конструкция и изготовлены производственные образцы установки для получения и контроля свойств межэлектродной среды и устройства для направления электрода-проволоки.

Установка удостоена бронзовой медали ВДНХ 1972 года.

12. Результаты работы внедрены на автозаводе им.Лихачева с экономическим эффектов 2500-3000 руб. в год на единицу оборудования.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Авраменко В.Е., Калинин М.А. Установка для получения деионизованной межэлектродной среды. Электрофизические и электрохимические методы обработки, 1971, № 9.

2. Авраменко В.Е., Калинин М.А. Выбор доминирующих факторов для построения математических моделей технологических характеристик электроэрозионной обработки непрофилированным электродом с помощью релаксационного генератора импульсов. "Электрофизические и электрохимические методы обработки", 1971, № 12.

3. Авраменко В.Е., Калинин М.А. Разработка и исследование математических моделей технологических параметров электроэрозионной обработки непрофилированным электродом при использовании релаксационного генератора импульсов. "Электрофизические и электрохимические методы обработки", 1972, № 1.

4. Авраменко В.Е., Калинин М.А. Выбор оптимальных условий электроэрозионной обработки непрофилированным электродом при использовании релаксационного генератора импульсов. "Электрофизические и электрохимические методы обработки", 1972, № 2.