



**ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ
ПРОШИВАНИЯ ОТВЕРСТИЙ
КОМБИНИРОВАННЫМИ МЕТОДАМИ**

**DESIGNING OF HOLE STITCHING
TECHNOLOGY BY COMBINED
METHODS**

Смоленцев Евгений Владиславович,
профессор кафедры технологии
машиностроения, д.т.н., профессор,
Воронежский государственный
технический университет, г. Воронеж, (РФ)

Smolentsev Evgeniy Vladislavovich,
doctor of tech. sc., professor, department
«Engineering Technology», Voronezh State
Technical University, Voronezh, (RF)

✉¹**Золототрубова Юлия Сергеевна**,
старший преподаватель кафедры графики,
компьютерного проектирования и дизайна,
Воронежский государственный
технический университет, г. Воронеж, (РФ)
e-mail: zolototrubova-y@mail.ru

✉¹**Zolototrubova Yulia Sergeevna**,
assistant professor, department of Graphics,
Computer Engineering and Design Voronezh
State Technical University, Voronezh, (RF)
e-mail: zolototrubova-y@mail.ru

Грицюк Василий Григорьевич,
заведующий кафедрой технологии
машиностроения, к.т.н., Воронежский
государственный технический университет,
г. Воронеж, (РФ)

Gritsyuk Vasily Grigorievich,
head of the department «Engineering
Technology», cand. of tech. sc., Voronezh
State Technical University, Voronezh (RF)

Аннотация.

В статье рассматривается проектирование комбинированного процесса обработки с наложением электромагнитных полей на основе ранее разработанной методологии. Показаны преимущества данного подхода к созданию новых методов обработки деталей, приводятся подтверждения в виде теоретических расчетов и результатов практического применения нового способа прошивания отверстий.

Annotation.

The article discusses the design of a combined processing process with the imposition of electromagnetic fields based on a previously developed methodology. The advantages of this approach to the creation of new methods of machining parts are shown, confirmations are given in the form of theoretical calculations and the results of practical application of a new method of stitching holes.

Ключевые слова: ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННАЯ ОБРАБОТКА, ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА, МЕТОДОЛОГИЯ, ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ.

Keywords: ELECTROEROSION TREATMENT, ELECTROCHEMICAL TREATMENT, METHODOLOGY, PRODUCTIVITY.

¹Автор для ведения переписки

1 Состояние исследования и актуальность работы

В современной экономике машиностроительные предприятия могут выжить только при условии обладания некими конкурентными преимуществами, которые сводятся к таким категориям, как время, качество и стоимость. Традиционные производственные процессы в подавляющем большинстве позволяют усилить отдельные преимущества, но при этом про-

исходят потери в привлекательности у потребителей по прочим параметрам. Так, например, снижение цены, как правило, подразумевает снижение качества или ресурса изделий, а повышение эксплуатационных характеристик вызывает увеличение сроков производства и привлечения дополнительных ресурсов. В результате, процессы, построенные на традиционных технологиях, часто не позволяют создавать продукцию, отвечающую запросам потребителей, особенно в областях, где требования к срокам и качеству самые строгие, а стоимость изделий традиционно высока. К таким отраслям можно отнести аэрокосмическую, нефтегазовую и другие. В связи с вышесказанным развитие производства в этих сферах может быть основано только на применении наукоемких технологий.

Одним из направлений исследований в области прогрессивных высокоэффективных технологий является объединение нескольких физических воздействий (например, термического, механического, химического, лучевого) в едином методе обработки с формообразованием за счет наложения электромагнитных полей на деталь или инструмент [1-4]. Накопленный опыт создания новых технологических процессов позволяет говорить о весьма высоком потенциале данного подхода к обработке материалов за счет достижения показателей, превосходящих аналогичные традиционных методов обработки вплоть до кратных значений. Вместе с тем, надо отметить, что до сих пор в производство было внедрено сравнительно небольшое количество методов, в то время как теоретически их число может достигать 800-900 [5-7].

Целенаправленный выбор формообразующих физических воздействий, основанный на накопленной научной базе знаний, позволяет получить оптимальное сочетание эффектов от различных видов обработки в одной технологической операции, что позволяет осуществить качественный переход к созданию новой техники и расширить возможности технологов и конструкторов при создании прогрессивных изделий. Созданные ранее теоретические основы и практический опыт внедрения позволяют эффективно применять методологию разработки новых процессов и решать задачи, которые стоят перед проектировщиками.

Анализ состояния вопроса о проектировании комбинированных методов обработки с наложением электромагнитных полей показывает, что подавляющее большинство созданных ранее способов были разработаны под решение конкретных, узконаправленных практических задач, что затрудняет возможность их экстраполяции для решения задач со схожими граничными условиями. Кроме того, разработанная ранее методология не в достаточной мере используется для снижения или полного устранения нежелательных эффектов от формообразующих воздействий, хотя это можно было бы реализовать за счет обоснованного управления внешними и внутренними связями в режиме реального времени. Так же надо отметить и недостаточную проработанность методики проектирования и изготовления электродов-инструментов для проектируемых комбинированным методом обработки, что снижает эффективность результатов проектирования. Еще одним фактором, ограничивающим область эффективного использования вышеуказанных способов обработки, является фактическое отсутствие оборудования, способного управлять внешними и внутренними связями в формообразующих воздействиях для достижения максимально возможного результата, коррелирующего с теоретически достижимыми показателями.

Научные исследования, проводившиеся ранее как в России [8-13], так и за рубежом [14-20] показывают, что даже частичное использование методической базы для проектирования новых способов обработки и средств технологического оснащения комбинированных методов, дают существенное повышение технологических параметров и позволяют перейти на качественно новый уровень при освоении изделий новых поколений. Таким образом, задача освоения разработанной ранее в работах [1, 5, 7] методологической базы является актуальной для производства и науки.

2 Материалы и методы

Наработанная практическая и теоретическая база знаний по формообразующим воздействиям на объекты дает основания судить о том, что можно создавать способы управле-

ния приоритетными технологическими показателями процессов на основании внешних и внутренних связей между видами подводимой энергии, их интенсивности, взаимного влияния, в том числе синергетического, что позволяет значительно повышать количественные и качественные характеристики результатов обработки. При этом также достигается значительное снижение трудоемкости проектирования новых технологических процессов, что является еще одним существенным преимуществом методологии.

Накопленный фактический материал по технологическим приложениям физических воздействий на объекты обработки позволяет считать, что возможно разработать пути управления качественными показателями технологических процессов, сочетающих различные виды воздействий, частично охватывающих количественные показатели и оценку величины интенсивности взаимного влияния составляющих комбинированного процесса на технологические показатели новых видов обработки. Это создает базу для разработки методологии ускоренного проектирования новых достоверных комбинированных технологических процессов с управляемым усилием положительных показателей при снижении интенсивности действия нежелательных факторов в случае участия в процессах нескольких взаимосвязанных воздействий, в том числе электрических и магнитных полей.

Комбинированные методы обработки являются недетерминированными процессами, включающими в себя композицию большого числа стохастических физических воздействий с вероятностью влияния на достигаемые технологические показатели. Эти управляющие факторы можно оценивать с учетом величины достоверности, которая определяется в ходе экспериментов, либо эмпирически. Одним из действенных способов формирования решения за счет выделения его из общего множества является метод делового конфликта. Он позволяет ограничивать количество оптимальных решений и формировать ядро конфликта, что дает возможность применять вероятностные показатели различных факторов и экспериментальные результаты для сокращения времени определения оптимального сочетания формирующих воздействий для комбинированного метода обработки.

Решение задачи по установлению закономерностей, обуславливающих упорядоченное воздействие внешних и внутренних факторов на количественные и качественные показатели метода обработки становится возможным благодаря разработанной ранее методологии проектирования комбинированных методов, что показано в работах [5, 7]. Решение при этом будет частным, основанным на базе знаний, накопленных в ходе опытных работ по изучению взаимных воздействий структурных составляющих, что отвечает целям проектирования. Наилучшие результаты при создании комбинированных процессов дают те методы, которые основаны на формообразующих воздействиях, хорошо изученных ранее с точки зрения моделирования их математических и физических составляющих. Вместе с тем, постоянное пополнение базы знаний позволяет с помощью методологии переносить полученный опыт на все большее число частных задач.

3 Результаты исследований

Техническое задание на проектирование нового техпроцесса содержит требования по достижению максимальной производительности при прошивании отверстий с диаметром до 5 мм в деталях из жаропрочных сталей и обеспечении точности и шероховатости на уровне полустачной обработки. Известно [7, 21, 26], что для обработки таких материалов наилучшим образом подходят электрофизикохимические методы, прежде всего – электрохимический и электроискровой. Недостатком их является достаточно низкая производительность, хотя точность, шероховатость и другие показатели имеют вполне удовлетворительные для заданных условий обработки значения. По производительности среди электрических методов можно отметить электроконтактную или электроимпульсную обработки, но они не обеспечивают качество на уровне, обозначенном в техническом задании. На основании окончательного анализа было принято окончательное решение о выборе электрохимической размерной обработки в качестве базового источника формообразующего воздействия в проек-

тируемом комбинированном процессе. Следующим этапом необходимо определить способы повышения производительности метода за счет подвода в зону обработки дополнительных физических воздействий. В литературе [4, 5] содержится достаточно много информации по поводу факторов, влияющих на скорость анодного растворения. Например, обеспечение ускоренного удаления продуктов обработки из межэлектродного зазора. Недостатками такого пути повышения производительности являются повышенные требования по оборудованию, увеличение энергозатрат и, главное, по достижении скорости проочки некоего критического значения резко снижается точность обработки, что недопустимо в рассматриваемом случае. Следующим способом, позволяющим повысить производительность при электрохимической обработке, является удаление окисных пленок с обрабатываемых поверхностей (депассивация). Это может осуществляться различными путями, например, механическим постоянным или импульсным воздействием, либо подводом тепловой энергии. Простое механическое воздействие достаточно трудно технически реализуемо при операции прошивки отверстий малого диаметра, поэтому данный вариант не рассматривался авторами. Известно [1, 2], что депассивацию можно выполнить воздействиями, достигаемыми при электроискровой, ультразвуковой, электроимпульсной и лазерной обработках. Как уже было сказано, показатели качества поверхности при электроимпульсной обработке не отвечают техническому заданию, поэтому добавление ее в комбинированный процесс должны привести к снижению его качества, что недопустимо. Опыт использования локального подогрева зоны обработки лазерным лучом имеется, депассивация обеспечивается, но лишь до тех пор, пока электролит прозрачный. Между тем, известно, что рабочая жидкость мутнеет практически сразу после начала анодного растворения за счет реакций, происходящих в ней. Таким образом, светолучевая интенсификация процесса также не подходит для варианта обработки, связанного с прошиванием отверстий. Следующим возможным путем повышения производительности может быть добавление электроискровой обработки. В этом случае удаление оксидной пленки с анода происходит за счет воздействия микровзрывов пузырей газа, образующегося при пробое межэлектродного зазора. Несмотря на возникающую пульсацию электролита снижения точности не происходит, что является преимуществом такой схемы. На практике такая комбинация уже реализована и поэтому известно, что при электроэрозионно-химической обработке происходит значительный прирост производительности, но только при прошивании на малую глубину. По мере осевой подачи катода-инструмента скорость удаления материала начинает снижаться и возвращается практически к значениям, характерным для электрохимического прошивания.

Наконец, можно применить эффект, получаемый за счет наложения колебаний. Механическое импульсное воздействие в этом случае технически реализуемо, дает необходимый эффект по съему металла и не оказывает существенного влияния на точность. Однако прироста производительности, сравнимого с тем, который достигается от введения электроэрозионной обработки, в данном случае достичь не удастся. В случае повышения частоты колебаний до ультразвука технологическая система значительно усложняется, жесткость ее снижается, а погрешности обработки увеличиваются. Таким образом, оптимальным является использование низкочастотных механических колебаний катода и / или анода.

Как уже было выше изложено, основной задачей проектирования является достижение высокой производительности процесса, которая, в случае схемы прошивки отверстий, будет определяться продольной подачей электрода-инструмента. Граничным условием будет некоторое значение глубины отверстия, после достижения которого производительность разрабатываемого процесса снизится на величину, большую или равную пяти процентам. Тогда вышеизложенное можно представить в виде функции (ψ):

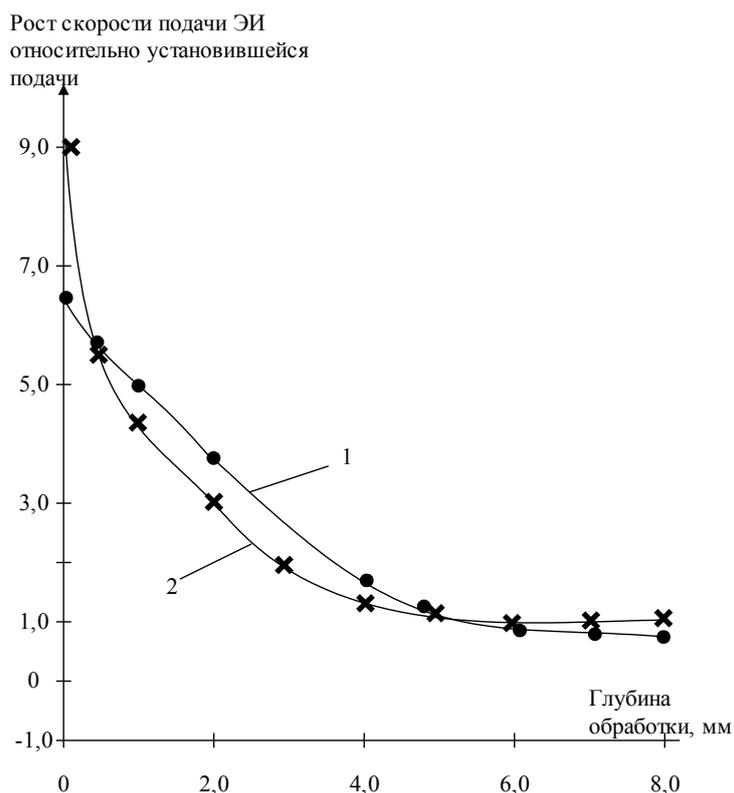
$$L_{пр} = \psi (P_{уд}, P_n, P_ж, \Delta, L_c, F_{тр}), \quad (1)$$

где $L_{пр}$ – критическая глубина отверстия; $P_{уд}$ – удельная сила на окружающую среду в момент разряда; P_n – давление в газовом пузыре, образовавшемся в результате пробоя межэлек-

тродного зазора; $P_{ж}$ – давление рабочей среды на участке входа в межэлектродный зазор (МЭЗ); L – расстояние между электродами; L_c – длина, по которой движется рабочая среда в межэлектродном зазоре в ходе обработки; $F_{тр}$ – коэффициент, учитывающий трение газовых пузырей со стенками анода и катода.

Расчеты, которые производились по имеющимся моделям, показали, что величина критической глубина $L_{пр}$ составляет от 3,5 до 4 мм. Экспериментальные значения, проведенные ранее, позволили получить величины 3... 5 мм (рис. 1).

График на рисунке 1 дает основание говорить о том, что можно использовать уравнение Клеро для расчета производительности исходя из глубины обрабатываемого отверстия.



1 – нержавеющая сталь; 2 – сталь 45

Рисунок 1 – Динамика изменения производительности при комбинации электроискровой и электрохимической обработок в зависимости от глубины отверстия

Из графика видно, что при глубине обработки от 0,5 до 3 мм можно упрощенно считать динамику скорости прошивания линейной и определять ее постоянной на основании установившегося значения более 3,5 мм.

Изменение размеров в радиальном направлении при комбинированной обработке (δ) определяется, прежде всего, из воздействий от электроэрозионной составляющей (δ_1) и электрохимической (δ_2), а также от других менее значимых точностных факторов (δ_3):

$$\delta = \delta_1 + \delta_2 + \delta_3. \quad (2)$$

Величина δ_1 является суммой значения эрозионного разрушения инструмента δ_1' в процессе обработки и конусности формообразуемого отверстия δ_1'' со стороны начала прожига. Известно, что важной положительной особенностью анодного растворения является отсутствие разрушения инструмента-катода, поэтому результирующее значение межэлектрод-

ного зазора δ увеличивается только на величину МЭЗ, которая будет составлять доли миллиметра. Радиальный износ электрода можно принять как износ только за счет эрозийного процесса. Как известно, при электроискровой обработке отверстий электрод принимает конусообразную форму с углом при вершине $\alpha = (0,3-0,5)^\circ$, при этом по мере подачи инструмента конус уменьшается.

Тогда упрощенно можно принять, что

$$\Delta_1' = \alpha \cdot L, \quad (3)$$

где L – глубина прошиваемого отверстия.

При комбинации электроэрозионной обработки с электрохимической радиальное изменение отверстия происходит главным образом за счет процесса анодного растворения, поэтому можно считать: $\delta_1 = \delta_1'$.

Увеличение диаметра отверстия происходит за счет процесса анодного растворения и имеет наименьшее значение со стороны выхода инструмента

$$\delta_2 = \sqrt{2\eta \frac{\alpha\chi}{\gamma} (U - \Delta U) \frac{L}{V_{срк}} + \Delta_{бок}^2} - \Delta_{бок}, \quad (4)$$

где η – коэффициент выхода по току; α – коэффициент, обозначающий электрохимический эквивалент материала обрабатываемой детали; γ – плотность материала; χ – значение электропроводности электролита; U – напряжение на катоде и аноде (40-70 В); ΔU – потери напряжения; $V_{срк}$ – средняя скорость прошивания отверстия; $\Delta_{бок}$ – начальный радиальный зазор в торце инструмента.

Среднюю скорость можно определить по уравнению:

$$V_{срк} = \left[\frac{(V_0 + V_{уст})}{2} L_{пр} + V_{уст}(L - L_{пр}) \right] \frac{1}{L} = \frac{L_{пр}}{2L} (V_{ко} - V_{уст}), \quad (5)$$

где $V_{ко}$ – скорость подачи электрода-инструмента в начале обработки; $V_{уст}$ – скорость подачи электрода-инструмента на уже установившемся режиме после прохождения электродом расстояния $L_{пр}$.

Значение параметра δ_3 определяется исходя из стабильности процесса, жесткостью и точностью изготовления системы СПИД. Величина этой составляющей может быть определена по аналогии с той, что присутствует в справочниках для механической обработки, например, в справочнике [7].

Микрошероховатость (параметр R_{zk}) после комбинированной электроэрозионно-химической обработки оценивают с учетом сглаживания анодным растворением вершин выступов между лунками, оставшимися от электроискровой составляющей.

$$R_{zk} = R_z - \left(\sqrt{2\eta \frac{\alpha}{\gamma} \chi (U - \Delta U) \frac{R_{zk}}{V_k} + \Delta_0^2} - \Delta_0 \right), \quad (6)$$

где R_z – высота неровностей после электроискровой обработки.

$$R_z = K_n A_u P, \quad (7)$$

где K_n – эмпирический коэффициент, для комбинированной обработки по [7] $K_n = 10 \dots 20$; A_u –

энергия импульса разряда; P – коэффициент, для комбинированного процесса по [5] $P \approx 1/3$; Δ_0 – исходное значение зазора между деталью и инструментом, как правило, определяется напряжением пробоя. Для данного комбинированного процесса можно принять $\Delta_0 = 0,05-0,1$ мм; V_k – скорость обработки, определяемая скоростью подачи электрода-инструмента при комбинированном процессе, определяется по той же формуле, что и скорость анодного растворения:

$$V_k = \frac{\eta\alpha\chi(U - \Delta U)}{\gamma\Delta_T}, \quad (8)$$

где Δ_T – расстояние между торцом катода-инструмента и обрабатываемой заготовки. Перед началом процесса устанавливают $\Delta_T = 0,05-0,1$ мм, после начала прошивания на установившемся режиме $\Delta_T = 0,25-0,3$ мм.

Такое изменение значения зазора объясняется тем, что чем глубже отверстие, тем сложнее выполнять прокачку и очистку рабочей среды, кроме того, при этом рабочая жидкость все больше загрязняется продуктами обработки. Как установлено, при прохождении отрезка, равного величине $L_{пр}$ скорость обработки определяется как скорость подачи инструмента на установившемся режиме.

Физическая модель образования неровностей и измененного после обработки поверхностного слоя (T) схожа, поэтому для оценки глубины последнего можно использовать коэффициенты, характеризующие величину лунки (K_H) и слоя (K_T) после электроискровой обработки:

$$T_k = \frac{K_T}{K_H} R_{zk}. \quad (9)$$

Зная высоту неровностей с использованием формул из [2, 3] можно определить величину предела выносливости металла (σ_{-1}) после обработки комбинированным методом

$$\sigma_{-1} = A \cdot R_a^\alpha. \quad (10)$$

По данным работы [3] для электрохимической обработки жаропрочных сплавов значения коэффициентов $A = 300-350$ и $\alpha = - (0,1-0,15)$.

Значения этих коэффициентов для электроискровой обработки близки к вышеуказанным, поэтому предел выносливости можно оценивать по величине микрошероховатости, которая после комбинации в едином процессе химического и термического воздействий сводится к показателям исходных процессов. Как показано в работе [2] усталостные испытания после комбинированной обработки не показали заметного снижения значения этого показателя. Износ электрода-инструмента обусловлен эрозией при электроискровой обработке и определяется отношением потерь материала инструмента к объему материала, снятому с детали. При формообразовании отверстий этот показатель можно рассчитать, как соотношение скоростей износа инструмента по его оси и скорости продольной подачи. В свою очередь износ инструмента при данной обработке (I_k) становится возможным выразить через известную формулу расчета износа, применяющуюся при электроэрозионной обработке ($I_{эро}$)

$$I_k = I_{эро} \cdot V / V_k, \quad (11)$$

где V – скорость подачи электрода-инструмента при обработке.

Из этого соотношения можно сделать вывод, что относительный износ электрода-инструмента будет меньше при комбинированной обработке, чем при электроискровой на

участке от начала обработки до критического значения $L_{пр}$. Потом износ будет повышаться, но его значения все равно останутся меньше, чем при простом электроэрозионном процессе.

Для завершения выбора оптимального при заданных условиях метода обработки был проведен анализ альтернативных комбинированных методов, которыми можно реализовать прошивку отверстий согласно техническому заданию (табл. 1).

Таблица 1 – Анализ выбора комбинированного метода обработки при прошивке отверстий

Методы обработки	Режимы и расчетные технологические показатели	Достигнутые показатели
Электрохимическая обработка с наложением дополнительных ультразвуковых колебаний	Напряжение на электродах – 10-15 В Частота колебаний электрода – 18-22 кГц Амплитуда колебаний электрода – до 0,04 мм Скорость осевой подачи инструмента $V_k = V_{эхо} + V_{узо}$, где $V_{узо}$ – скорость удаления материала за счет ультразвуковой интенсификации процесса анодного растворения; $V_{эхо}$ – скорость анодного процесса	Скорость осевой подачи – 0,045-0,05 мм/с Шероховатость после обработки – $(2,5-3) \cdot 10^{-3}$ мм Погрешность (по диаметру) – 0,35-0,4 мм Удельный расход энергии – 100-120 квт. ч/кг
Электрохимическая размерная обработка с наложением дополнительных низкочастотных колебаний	Напряжение на электродах – 10-15 В Частота колебаний электрода – 10-100 Гц Амплитуда колебаний электрода – $(0,3-0,5)\Delta_0$ Скорость прокачки электролитической жидкости $V_{ж} > 2$ м/с Скорость продольной подачи катода – инструмента $V_k = \frac{\alpha}{\gamma} \eta \frac{\beta \chi (U - \Delta U)}{\Delta}$ где β – коэффициент, учитывающий воздействие дополнительных низкочастотных колебаний ($\beta = 1,2-1,3$)	Скорость продольной подачи катода возрастает на 20 % Остальные показатели находятся на уровне электрохимической размерной обработки
Электрохимическая размерная обработка с облучением лазером	Напряжение на электродах – 6-8 В Скорость продольной подачи катода – инструмента $V(L) = \frac{\alpha}{\gamma} \eta \frac{\chi (U - \Delta U) \beta}{\Delta}$ β – коэффициент, учитывающий воздействие лазерного излучения ($\beta = 15-30$)	Скорость продольной подачи катода-инструмента в начале обработки возрастает до 2000 % от показателей традиционной обработки

Как уже было сказано выше, к таким методам можно отнести электрохимическую размерную обработку с наложением ультразвука, электрохимическую размерную обработку с наложением низкочастотных колебаний, а также обработку с введением энергии лазера в зону обработки. Было подтверждено, что для отверстий с глубиной до 5 мм оптимальной является электроэрозионнохимическая, а для более глубоких – электрохимическая размерная обработка, обработка с наложением колебаний различного вида. В случае, если катод-инструмент можно изготовить с приемлемыми габаритными размерами и массой, то ультразвуковые колебания являются оптимальным вариантом интенсификации анодного растворения. Соответственно, при необходимости обработки крупных полостей и отверстий целесообразно использовать вибраторы с низкой частотой колебаний, которые хотя и не дают высокого прироста производительности, технически проще, экономичнее и не вызывают до-

полнительных погрешностей обработки. Введение лазерного воздействия хотя и дает потенциально огромный прирост производительности, но технически весьма ограничено, например, использованием постоянно обновляющейся рабочей среды, а подвод в зону обработки луча при прошивании отверстий и вовсе требует поиска индивидуальных решений при разработке конструкций оборудования и оснастки, при этом успешный исход разработок не гарантирован. Наибольшее применение электрохимическая размерная обработка с наложением лазерного излучения может найти для формообразования мелких полостей с небольшими габаритами.

Проектирование конкретного технологического процесса ведется по известным методикам для базовой обработки с учетом влияния воздействий от вспомогательных методов. Вместе с тем, имеются некоторые особенности при разработке:

- при проектировании электрода инструмента надо учитывать, что его конструкция будет аналогична приведенной в работе [4] для электрохимической обработки;
- средства технологического оснащения для данного процесса комплектуются из серийно выпускаемых комплектующих, что показано в работе [4], с последующей адаптацией применительно к условиям обработки;
- для отработки нетехнологичности учитываются требования и базового, и дополнительных методов обработки;
- вопросы экологии и техники безопасности при эксплуатации оборудования и утилизации продуктов обработки описаны в работе [4].

Результаты исследований режимных параметров комбинированной электроэрозионно-химической прошивки (глубина обработки до 5 мм) для различных материалов показаны в таблице 2.

Таблица 2 – Режимные параметры комбинированной обработки

Материал	Состав электролита	Напряжение на электродах, В	Скорость прокачки электролита, м/с
Сталь 45	Токопроводящие эмульсии (например, смазывающе-охлаждающие жидкости) Растворы NaNO_3 (концентрация от 6 до 8 %) с добавлением от 0,5 до 1 % NaNO_2	45-65	более 4
12-08X18H10T 1X12H2BMФ	Токопроводящие эмульсии (например, смазывающе-охлаждающие жидкости) Растворы NaNO_3 (концентрация от 6 до 8 %) с добавлением от 0,5 до 1 % NaNO_2	30-40	4-6
BT18У	Растворы NaCl (концентрация от 6 до 10 %)	40-60	5-8
AK12 (AL2)	Слабые растворы NaNO_3	45-55	3-5

Проведенные расчеты позволили получить численные значения технологических показателей для получения некруглого отверстия глубиной 3 мм в детали из нержавеющей стали. Результаты вычислений, применительно к различным видам обработки, показаны в таблице 3.

По результатам, приведенным в таблице 3, можно судить о том, что все рассмотренные методы отвечают требованиям технического задания по основным технологическим параметрам. Но вместе с тем необходимо учитывать факторы, ограничивающие возможности использования перечисленных технологий. Например, холодное выдавливание может быть рентабельным при крупной серии деталей, так как затраты времени и ресурсов на изготовление оснастки превышает те же показатели для остальных методов на порядок. Электроимпульсная обработка позволяет гарантированно получить заданные параметры шероховатости

только при использовании графитового электрода-инструмента, но в этом случае может потребоваться дополнительная операция по удалению образующегося на обработанной поверхности осадка. Комбинированное прошивание не имеет подобных негативных особенностей и является предпочтительным методом.

Таблица 3 – Технические и экономические показатели обработки отверстия

Вид обработки	Технические показатели		Экономические показатели	
	Погрешность, квалитет	Шероховатость, R_a , мкм	Трудоемкость, мин	Энергоемкость, кВт·час/дет
Холодное выдавливание	8-9	0,32-0,64	0,02	0,01
Электроискровая прошивка	9-10	1,25-5	4,5	0,08
Электроимпульсная прошивка	9-10	10-20	3,5	0,08
ЭХО	9-10	0,64-1,25	2,2	0,1
Электро-эрозионно-химическая прошивка	9-10	1,25-2,5	1,5	0,05

Таким образом, новый процесс дает возможность обрабатывать с максимальной производительностью отверстия диаметром до 5 мм в любых металлах и их сплавах, а в случае большей глубины удаление металла все равно в 2-3 раза превышает возможности традиционных методов.

На рисунке 2 показаны детали, на которых отрабатывался спроектированный технологический процесс.

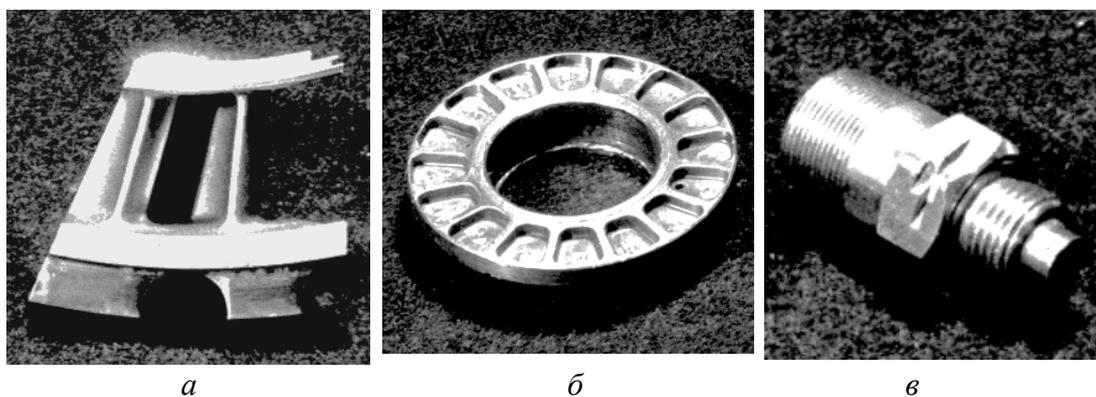


Рисунок 2 – Детали, изготовленные из специальных сплавов, обработанные комбинированным электроэрозионнохимическим методом

Особенностями их конструкции является наличие межлопаточных каналов (*a*), пазов глубиной 2,5 мм (*б*), отверстий малого диаметра с осью, перпендикулярной торцу (*в*).

Низкая технологичность деталей на рисунке 2 обусловлена их конструктивными элементами. Так, для первой детали геометрию некоторых элементов невозможно получить механической обработкой вследствие того, что не обеспечивается доступ инструмента к зоне обработки. Для обработки пазов детали на рисунке 2, *б* необходимо получить заданный профиль сопряжения боковых стенок и дна, при этом наличие заусенцев после обработки не допускается, кромки необходимо скруглить. Комбинированным методом можно получить за один проход нужную геометрию по всей поверхности, при этом заусенцы исключены. В де-

тали на рисунке 2, в необходимо было получить отверстие, которое при обычном сверлении имеет большую вероятность поломки сверла и сопровождается образованием недопустимых заусенцев. В таблице 4 показаны сравнительные показатели изготовления деталей, приведенных на рисунке 2.

Таблица 4 – Сравнительные показатели изготовления деталей

Вид обработки	Погрешность, мм для деталей на рисунке 2			Шероховатость Ra. мкм для деталей:			Общая трудоемкость (мин) операции для деталей:		
	<i>a</i>	<i>б</i>	<i>в</i>	<i>a</i>	<i>б</i>	<i>в</i>	<i>a</i>	<i>б</i>	<i>в</i>
Механическая обработка лезвийным инструментом	обработка невозможна	0,1-0,15	± 0,15	обработка невозможна	5-6	5-6	обработка невозможна	18,5	5,5
Электроискровая обработка	0,2-0,3	0,15-0,3	0,3	1,25-2,5	2,5-5	2,5-5	120 ч (при встречной прошивке)	9,2 (много-электродная обработка)	10
Электрохимическая обработка	0,15-0,2	0,1-0,15	0,15	0,63-1,25	0,63-1,25	1,25-2,5	40 ч	8	5
Электроэрозионнохимическая	0,1-0,2	0,1-0,2	0,15-0,2	1,25-2,5	1,25-2,5	1,25-2,5	12 ч	2	1,2

4 Обсуждение и заключение

Анализ показателей подтверждает правильность использования электроэрозионнохимической обработки для достижения целей проектирования, указанных в начале статьи. Достигнутые показатели производительности комбинированной электроэрозионнохимической обработки при формообразовании отверстий значительно превышают аналогичные как для традиционных электрических методов, так и для других перспективных комбинированных методов. Также очевидно, что для отверстий глубиной до 5 мм средняя величина скорости обработки значительно выше того же параметра при электроэрозионной и электрохимической обработке, что позволяет достичь цели проектирования. Такие показатели процесса, как погрешность обработки, микрошероховатость и удельная энергоемкость остались примерно на том же уровне, что и для базовых методов. Износ электрода-инструмента снизился на порядок, а в начале обработки его значение было близко к значению для безизносной схемы, при чем, что очень важно, скорость обработки поддерживалась на заданном уровне.

Из таблицы 4 видно, что выигрыш (прибыль) от внедрения КМО возрастает по мере усложнения формы обрабатываемой поверхности. Для деталей на рисунке 2, б, основным преимуществом по сравнению с механической обработкой является отсутствие заусенцев и скругление кромок при использовании ЭХО и КМО. Основным ограничением области использования электроэрозионнохимического процесса является большая глубина обработки. Имеются различные [1, 7, 11] мнения по этому вопросу, но более целесообразной является прошивка углублений с величиной до 4-6 мм.

Список литературы

- 1 Комбинированные методы обработки / В. П. Смоленцев, А. И. Болдырев, А. В. Кузовкин, Г. П. Смоленцев, А. И. Часовских. Воронеж : ВГТУ, 1996. 168 с.
- 2 Смоленцев В. П. Влияние электрохимической размерной обработки на физико-механические характеристики металлов // Электрохимическая обработка металлов. Сб. науч. тр. Кишинев: "Штиинца", 1972.
- 3 Сулима А. М. Качество поверхностного слоя и усталостная прочность деталей из жаропрочных и титановых сплавов / А. М. Сулима, М. И. Евстигнеев. М. : Машиностроение, 1974.
- 4 Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов. В 2 т. / Под ред. В. П. Смоленцева. М : Высшая школа, 1983.
- 5 Смоленцев Е. В. Проектирование электрических и комбинированных методов обработки. М. Машиностроение. 2005. 511 с.
- 6 Состояние и перспективы развития комбинированных методов обработки / Смоленцев В. П., Смоленцев Е. В. // Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П. А. Соловьева. 2017. № 2 (41). С. 5-9.
- 7 Справочник технолога (справочное издание) / под. ред. Сулова А. Г. // М. : Инновационное машиностроение, 2019. 800 с.
- 8 Абляз Т. Р. Изучение изменения свойств электродов в зависимости от режимов проволочно-вырезной электроэрозионной обработки // Вестник ПГТУ. Машиностроение, материаловедение. – 2011. – Т. 13. – № 1. – С. 87-93.
- 9 Абляз Т. Р., Шлыков Е. С., Кремлев С. С. Применение электродов-инструментов с покрытием для электроэрозионной обработки стали 38X2H2MA // СТИН. – 2017. – № 5. – С. 20-21.
- 10 Эмпирическое моделирование межэлектродного при электроэрозионной обработке стали 38X2H2MA / Т. Н Абляз, Е. С. Шлыков, Д. А. Борисов, А. А. Шумков, И. Ю. Летягин // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2017. – Т. 19, № 2. – С. 67-79.
- 11 Куц, В. В. Исследование процесса получения отверстий полым электродом на модернизированном электроэрозионном станке ЧПУ / В. В. Куц, М. С. Разумов, Д. А. Зубков, А. С. Бышкин, А. А. Неструев // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2020. № 3. С. 395-402.
- 12 Science-based technologies creation based on combined processing methods for fabrication aerospace filters / A. Yu. Ryazantsev, A. A. Shirokozukhova, V. G. Gritsyuk // Materials Today : Proceedings, 19 (2019), 2065-2067. DOI: 10.1016/j.matpr.2019.07.075.
- 13 Innovative Methods For Obtainig Artificial Roughness On The Surfaces Of Heat-Loaded Parts Of The Liquid Rocket Engines Combustion Chamber / A. Yu. Ryazantsev, A. A. Shirokozukhova, Yukhnevich S. S. // AIP Conference Proceedings 2318, 030004 (2021); <https://doi.org/10.1063/5.0035987>.
- 14 Micro electrical discharge machining single discharge temperature field simulation / Z. L. Peng, Y. N. Li, D. Fang, Y. Y. Zhang. – USA : JCPRC5, 2013. - P. 859-864.
- 15 Jiajing Tang, Xiaodong Yang. A Thermo-hydraulic Modeling for the Formation Process of the Discharge Crater in EDM // 18th CIRP Conference ISEM XVIII. – 2016. – № 42. – P. 685-690.
- 16 Obara H. Detection of Discharging Position on WEDM // Proceedings of 10th ISEM,

1992 – p. 404-409.

17 Umang Maradia. Meso-Micro EDM : diss. Dr. sc. ETH Zurich No. 22024. – Zurich, 2014. – 246 p.

18 Matthias Hackert-Oschatzchen. Single Discharge Simulations of Needle Pulses for Electrothermal Ablation. – Rotterdam : COMSOL Conference, 2013. – P. 1-5.

19 Weingartner E., Kuster F., Wegener K. Modeling and simulation of electrical discharge machining // 1st CIRP Global Web Conference. – 2012. – № 2. – P. 74-78.

20 Chander Parkash Khatter Analysis of surface integrity in electrical discharge machining (EDM) process for tungsten carbide material: dis. Ph. D. - Patiala, India, 2010.

21 Абляз, Т. Р., Борисов Д. А., Шлыков Е. С. Моделирование процесса формирования единичной лунки при электроэрозионной обработке // СТИН. – 2018. – № 2. – С. 27-31.

22 Cetin, S., Okada, A., Uno, Y. Effect of Debris Distribution on Wall Concavity in Deep-hole EDM // JSME International Journal Series C. – 2004. – Vol. 47. – P. 553.

23 Schumacher B. M. After 60 years of EDM the discharge process remains still disputed // J. Matl. Proc. Tech. – 2001 Vol. 149. – P. 376-381.

24 Abbas N. M., Solomon D. G., Bahari Md. F. A review on current research trends in electrical discharge machining (EDM) Int. J. Mach. Tools Manuf. – 2007. – Vol. 47. – P. 1214-1228.

25 Liao Y. S., Wu P. S., Liang F. Y. Study of debris exclusion effect in linear motor equipped die-sinking EDM process // Procedia CIRP. – 2013. – № 6. – P. 123-128.

26 Валетов В. А., Медунецкий В. В. Характерные особенности формирования функциональных поверхностей пресс-форм на электроэрозионном оборудовании для изготовления конструктивных элементов приборов / Труды нижегородского государственного технического университета им. Р. Е. Алексеева. – Н. Новгород : Изд-во НГТУ, 2012. – С. 342-347.

27 Zahiruddin M., Kunieda M. Energy distribution ratio into micro EDM electrodes // Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing. – 2010. – № 4 (6). – P. 1095-1106.

28 Das S., Klotz M., Klocke F. EDM simulation: finite element-based calculation of deformation, microstructure and residual stresses // Journal of Materials Processing Technology. – 2003. – Vol. 142 (2). – P. 434-451.

29 Tao J., Ni J., Shih A J. Modeling of the anode crater formation in electrical discharge machining // Journal of Manufacturing Science and Engineering. – 2012. – Vol. 134 (1). – P. 011002.

References

1 Combined processing methods / V. P. Smolentsev, A. I. Boldyrev, A. V. Kuzovkin, G. P. Smolentsev, A. I. Chasovskikh. Voronezh : VSTU, 1996. 168 p.

2 Smolentsev V. P. The influence of electrochemical dimensional processing on the physical and mechanical characteristics of metals // Electrochemical processing of metals. Collection of scientific articles Chisinau: "Stinza", 1972.

3 Sulima A. M. Surface layer quality and fatigue strength of parts made of heat-resistant and titanium alloys / A. M. Sulima, M. I. Evstigneev. M. : Mashinostroenie, 1974.

4 Electrophysical and electrochemical methods of materials processing. In 2 vols. / Edited by V. P. Smolentsev. Moscow: Higher School, 1983.

5 Smolentsev E. V. Design of electrical and combined processing methods. M. Mechanical engineering. 2005. 511 p.

6 State and prospects of development of combined processing methods / Smolentsev V. P., Smolentsev E. V. // Bulletin of the Rybinsk State Aviation Technological Academy named after P. A. Solovyov. 2017. №. 2 (41). pp. 5-9.

7 Technologist's Handbook (reference edition) / ed. Suslova A. G. // M. : Innovative mechanical engineering, 2019. 800 p.

8 Ablyaz T. R. Study of changes in the properties of electrodes depending on the modes of wire-cut electroerosion treatment // Bulletin of PSTU. Mechanical engineering, materials science. – 2011. – Vol. 13. – №. 1. – pp. 87-93.

9 Ablyaz T. P., Shlykov E. C., Kremlev S. S. Application of coated tool electrodes for electroerosion treatment of 38X2N2MA steel // STIN. – 2017. – №. 5. – pp. 20-21.

10 Empirical modeling of interelectrode flow during electroerosion treatment of 38X2N2MA steel / T. N., Balyas, E. S. Shlykov, D. A. Borisov, A. A. Shumkov, I. Yu. // Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Mechanical engineering, materials science. – 2017. – Vol. 19, №. 2. – pp. 67-79.

11 Kutz V. V. Investigation of the process of obtaining holes with a hollow electrode on a modernized electroerosion CNC machine / V. V. Kutz, M. S. Razumov, D. A. Zubkov, A. S. Byshkin, A. A. Nestruev // Izvestiya Tula State University. Technical sciences. 2020. №. 3. pp. 395-402.

12 Science-based technologies creation based on combined processing methods for fabrication aerospace filters / A. Yu. Ryazantsev, A. A. Shirokzhukhova, V. G. Gritsyuk // Materials Today : Proceedings, 19 (2019), 2065-2067. DOI : 10.1016/j.matpr.2019.07.075.

13 Innovative Methods For Obtaining Artificial Roughness On The Surfaces Of Heat-Loaded Parts Of The Liquid Rocket Engines Combustion Chamber / A. Yu. Ryazantsev, A. A. Shirokzhukhova, Yukhnevich S. S. // AIP Conference Proceedings 2318, 030004 (2021); <https://doi.org/10.1063/5.0035987>.

14 Micro electrical discharge machining single discharge temperature field simulation / Z. L. Peng, Y. N. Li, D. Fang, Y. Y. Zhang. – USA : JCPRC5, 2013. – P. 859-864.

15 Jiajing Tang, Xiaodong Yang. A Thermo-hydraulic Modeling for the Formation Process of the Discharge Crater in EDM // 18th CIRP Conference ISEM XVIII. – 2016. – № 42. – P. 685-690.

16 Obara H. Detection of Discharging Position on WEDM // Proceedings of 10th ISEM, 1992 – p. 404-409.

17 Umang Maradia. Meso-Micro EDM : diss. Dr. sc. ETH Zurich №. 22024. – Zurich, 2014. – 246 p.

18 Matthias Hackert-Oschatzchen. Single Discharge Simulations of Needle Pulses for Electrothermal Ablation. – Rotterdam: COMSOL Conference, 2013. – P. 1-5.

19 Weingartner E., Kuster F., Wegener K. Modeling and simulation of electrical discharge machining // 1st CIRP Global Web Conference. – 2012. – № 2. – P. 74-78.

20 Chander Parkash Khatter Analysis of surface integrity in electrical discharge machining (EDM) process for tungsten carbide material : dis. Ph. D. – Patiala, India, 2010.

21 Ablyaz, T. P., Borisov D. A., Shlykov E. C. Modeling of the formation of a single well during electroerosion treatment // STIN. – 2018. – №. 2. – pp. 27-31.

22 Cetin, S., Okada, A., Uno, Y. Effect of Debris Distribution on Wall Concavity in Deep-

hole EDM // JSME International Journal Series C. – 2004. – Vol. 47. – P. 553.

23 Schumacher B. M. After 60 years of EDM the discharge process remains still disputed // J. Matl. Proc. Tech. – 2001 Vol. 149. – P. 376-381.

24 Abbas N. M., Solomon D. G., Bahari Md. F. A review on current research trends in electrical discharge machining (EDM) Int. J. Mach. Tools Manuf. – 2007. – Vol. 47. – P. 1214-1228. Relationship between occurrence of material removal and bubble expansion in electrical discharge machining / S. Hayakawa, Y. Sasaki, F. Itoigawa, T. Nakamura // Proc. of the 17th CIRP Conf, on Electro Physical and Chemical Machining (ISEM). – 2013. – P. 174-179.

25 Liao Y. S., Wu P. S., Liang F.Y. Study of debris exclusion effect in linear motor equipped die-sinking EDM process // Procedia CIRP. – 2013. – № 6. – P. 123-128.

26 Valetov V. A., Medunetsky V. V. Characteristic features of the formation of functional surfaces of molds on electroerosion equipment for the manufacture of structural elements of devices / Proceedings of the Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev. – N. Novgorod: Publishing House of NSTU, 2012. – pp. 342-347.

27 Zahiruddin M., Kunieda M. Energy distribution ratio into micro EDM electrodes // Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing. – 2010. – № 4 (6). – P. 1095-1106.

28 Das S., Klotz M., Klocke F. EDM simulation: finite element-based calculation of deformation, microstructure and residual stresses // Journal of Materials Processing Technology. – 2003. – Vol. 142 (2). – P. 434-451.

29 Tao J., Ni J., Shih A J. Modeling of the anode crater formation in electrical discharge machining // Journal of Manufacturing Science and Engineering. – 2012. – Vol. 134 (1). – P. 011002.

© Смоленцев Е.В., Золототрубова Ю.С., Грицюк В.Г., 2021