

Определение силовых факторов, влияющих на формообразование поверхности при электроэрозионной вырезной обработке

В. И. Осипенко,* А. П. Плахотный

Черкасский государственный технологический университет,
г. Черкассы, 18006, Украина, *e-mail: o.plakhotny@chdtu.edu.ua

Поступила 20.06.18

После доработки 23.07.2018

Принята к публикации 23.07.2018

Представлены результаты экспериментальных и теоретических исследований по созданию экспериментально-расчетной методики для определения величины распределенной внешней нагрузки, действующей на проволоку при электроэрозионном резании определенных групп сталей и твердых сплавов. Достоверность результатов и работоспособность полученных уравнений и моделей подтверждены экспериментально. Их использование на этапе проектирования технологического процесса позволяет рассчитывать реальную форму проволочного электрода и с ее учетом строить технологию обработки и соответствующую траекторию движения приводов станка.

Ключевые слова: электроэрозионная вырезная обработка, интенсивность искрения, прогиб проволоки-электрода, формообразование поверхности.

УДК 621.9.048.4

DOI: 10.5281/zenodo.1968973

ВВЕДЕНИЕ

Электроискровая обработка и ее ветвь – электроэрозионная вырезная обработка (ЭЭВО) с момента своего изобретения шаг за шагом развивались и прочно заняли заслуженное место среди высокоэффективных технологий, широко используемых в производстве [1]. Многие технические и технологические проблемы уже решены за время становления технологии, но и сейчас продолжается ее совершенствование.

Одной из актуальных проблем, над решением которой работают многие исследователи, является задача обеспечения требуемой точности формообразования детали нежестким проволочным электродом при ЭЭВО. Электроискровая обработка больше не рассматривается как процесс «без сил» [2]. Исследования проводятся для того, чтобы понять, какие силы действуют на изменение формы электрода и как они могут влиять на точность обработки.

Возрастающая значимость силовых факторов вызвана двумя направлениями развития современной ЭЭВО. Первое – обеспечение высокой точности при резании толстых 300 мм деталей на серийных станках [3]. Увеличение расстояния между точками фиксации проволочного электрода неизбежно приводит к потере его поперечной жесткости. Второе – увеличение производительности ЭЭВО до 500 мм²/мин [4], что достигается высокой интенсивностью искровых разрядов, вызывающих повышение силовой

нагрузки на электрод. Все это в совокупности приводит к отклонению проволочного электрода от прямолинейной формы, потере контроля над формообразованием поверхности и, возможно, к выходу за пределы параметров точности, предъявляемых к прецизионным деталям.

АНАЛИЗ ЛИТЕРАТУРНЫХ ДАННЫХ. ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

В ходе развития метода электроэрозионной обработки непрофилированным проволочным электродом многие авторы уделяли значительное внимание вопросам повышения точности обработки. К основным первичным погрешностям большинство авторов относят следующие: погрешности, обусловленные геометрической точностью приводов станка; вызванные колебаниями проволоки в направляющих; обусловленные неточностью изготовления проволоки; обусловленные наличием межэлектродного электрического промежутка; обусловленные неточностью определения координат базовых поверхностей; вызванные износом проволоки; погрешности температурных деформаций; погрешности, вызванные внутренними остаточными напряжениями; обусловленные прогибами проволочного электрода под действием силовых электрических разрядов. Большинство из них сведено до минимума, но самая существенная погрешность, вызванная прогибами проволочного электрода, остается не

преодоленной в полной мере. Как следствие, погрешность формообразования на черновом резе полного съема может составлять 0,02–0,4 мм в зависимости от технологических условий и конфигурации вырезаемого контура.

Задачу повышения точности разделяют на две части: определение прогиба проволоки для конкретных условий и разработка стратегий компенсации погрешности.

Аппаратный контроль формы проволочного электрода в реальном режиме времени (on-line) предложили в свое время и используют на своих станках в виде системы AGIEPILOT разработчики фирмы AGIE [5, 6]. Датчик позиционирования проволоки состоит из двух оптических пар, расположенных во взаимно ортогональных направлениях. Между ними находится проволочный электрод. Коллимированный луч света проходит мимо электрода, попадая на самофокусирующийся объектив, за которым находятся два оптоволоконка. По разности интенсивности сигнала на них определяют смещение электрода. Датчик расположен между верхней направляющей проволочного электрода и поверхностью детали. Измерение проводится далеко от зоны эрозии, то есть от места максимального прогиба. Поэтому используется математическая модель упругого состояния проволоки под действием поперечной распределенной нагрузки для пересчета измеренных данных в значении максимального прогиба.

Впоследствии с развитием вычислительных мощностей компьютерной техники и появлением программных систем автоматизированного проектирования стало возможным и более рациональным предварительное проектирование технологического процесса ЭЭВО до его непосредственной реализации. При этом задача прогнозирования формы проволочного электрода и соответствующего формообразования поверхности при его движении по заданному контуру решается по-разному.

Многие исследователи применяют статистические методы анализа многопараметрических экспериментальных данных (ANOVA методы, Taguchi методологию), строят уравнения регрессии и на основании обобщения полученного опыта предлагают проводить проектирование последующих технологических процессов ЭЭВО. В работе [7] исследуются ошибки формообразования при вырезании внешних и внутренних углов с малыми радиусами округления при вершине. Используется трехпроходная обработка и отмечается, что первый черновой рез вносит наибольшую погрешность, вызванную отклонением проволочного электрода. С помощью следующих двух

финишных проходов ошибка уменьшается. Получены соотношения между величиной раствора угла, радиусом при вершине и количеством оставшегося, невыбранного материала на основании чисто геометрической модели, и авторы считают, что результаты не зависят от материала заготовки.

Статистические методы используются и в работе [8] при исследовании электроэрозионного вырезания углов деталей из труднообрабатываемого традиционными методами сплава Monel 400, состоящего в основном из никеля 67,4%, меди 29,24% и других компонентов. В работе [9] авторы указывают на необходимость анализа силового воздействия на проволочный электрод в результате искровых разрядов и их изменения при обходе углов. Но впоследствии используют упрощенную модель формы электрода, в которой принимается одинаковый прогиб по всей высоте реза, предлагают чисто геометрическую, эллиптическую модель построения траектории при вырезании углов. В итоге применяется обобщенная нелинейная регрессивная модель для оптимизации технологических параметров с целью уменьшения ошибки при обработке углов.

Авторы работ [10, 11] провели ранжирование параметров ЭЭВО по степени влияния на ошибку формообразования при конусном резании (четырёхкоординатная обработка с большими углами наклона), используя методы систематизации статистических данных экспериментов. Показано, что при больших деформациях проволочного электрода определяющую роль играют геометрические параметры – угол наклона, толщина детали и механические параметры самой проволоки. Авторы делают предположение о малой значимости технологических параметров ЭЭВО, и дальнейшее моделирование проводится с пренебрежением их влияния на форму электрода. Использована нелинейная модель на основе метода конечных элементов (МКЭ) для уточнения уровня деформации проволочного электрода вблизи направляющих. Эксперименты проводились с использованием образцов из инструментальной стали и карбида бора, режимы обработки которых по энергетическим параметрам искровых разрядов отличались почти в два раза. Очевидно, использованная МКЭ-модель достаточно точно учитывает статическую деформацию при искривлении электрода в широко разведенных направляющих в условиях конусного резания, но не улавливает изменения формы при существенном изменении поперечной нагрузки на электрод от воздействия искровых разрядов.

Экспериментальные исследования с использованием метода Taguchi, которые включают тринадцать контрольных факторов с тремя уровнями, приведены в работе [12]. Обработывалась заготовка толщиной 28 мм из штамповой стали (0,85% С, 4% Cr, 6,25% W, 5% Mo, 2% V), закаленная и отожженная. При сравнении дисперсии и степени вклада для каждого управляющего фактора установлено, что наиболее значимыми причинами геометрической погрешности из-за прогиба проволоки являются время действия импульса, время паузы между импульсами и импульсный пиковый ток во время чернового резания. Именно интенсивность искровых разрядов определяет величину боковой нагрузки на проволочный электрод, вызывающей его отклонение. Обнаружено также, что скорость чернового резания зависит от изменения вышеперечисленных параметров и пропорциональна уровню энергии, подведенной в зону обработки и выделенной во время разрядов. То есть скорость резания может служить показателем величины боковой нагрузки на электрод. К сожалению, авторы не привели формул, дающих возможность количественно определить такую связь.

В более поздней работе [13] отражены результаты экспериментов по обработке пластин разной толщины из такой же штамповой стали. Вырезались цилиндры, измерялись погрешности формы и по разработанной авторами математической модели, связывающей распределенную нагрузку, прогиб проволочного электрода и параметры формообразования при движении изогнутого электрода по окружности, рассчитывалась величина интенсивности сил искровых разрядов. Установлено, что $q \cdot t = \text{const} = 24,372 \times 10^{-3}$, где q (кГ/мм) – интенсивность сил, вызванных искровыми разрядами, t (мм) – высота обработки. Полученное соотношение дает возможность вычислить интенсивность сил, а значит, и прогиб электрода для других высот обработки при остальных, сходных с экспериментом условиях обработки.

Результаты экспериментов прямого измерения сил от действия искровых разрядов приведены в работе [2]. Использовались пьезокерамические датчики для регистрации динамических сил, лазерным интерферометром контролировался межэлектродный зазор, две высокоскоростные камеры с программным управлением задержек для синхронизации по времени с искровыми разрядами дали возможность наблюдать развитие газовых пузырьков в диэлектрической жидкости и определять параметры вибрации и величину отклонения электрода от воздействия возникающих сил. Хотя исследования

проводились для параметров импульсов прошивной электроэрозионной обработки, полученные закономерности дают возможность понять суть общих физических процессов возникновения и развития сил, связанных с искровыми разрядами в жидкости.

Отклонению проволочного электрода способствуют также гидродинамические силы струи рабочей жидкости, подаваемой в междуэлектродный промежуток с верхней и нижней камер промывки [14, 15]. Средствами вычислительной гидродинамики (CFD) в коммерческом программном пакете ANSYS по МКЭ проведены моделирование прогиба проволочного электрода и сравнение результатов с экспериментальными измерениями. Получена интересная зависимость прогиба электрода от длины прорезанного паза. Установлено, что с увеличением давления в камерах промывки улучшается эвакуация продуктов эрозии из межэлектродного промежутка, но при этом увеличивается прогиб проволочного электрода, что негативно влияет на точность обработки. И наоборот, с уменьшением давления уменьшается прогиб и ухудшается удаление продуктов эрозии, что приводит к снижению скорости реза и даже к обрыву проволоки. Получены очень важные количественные данные распределения потока рабочей жидкости, инициирующего прогиб проволочного электрода, но ввиду необходимости использования мощного вычислительного ресурса весьма проблематичным выглядит применение метода в повседневной практике инженерного проектирования технологических процессов ЭЭВО.

Исследовано действие электростатических и электромагнитных сил, вызывающих отклонение электрода в работе [16]. Анализ ошибки формообразования при вырезании внешних острых углов из тонких пластин показал, что направление изгиба острия угла зависит от состава обрабатываемого материала – алюминия или углеродной стали. Приведена формула для оценки вклада электромагнитных сил в суммарное воздействие на проволочный электрод. Существенного значения ошибка достигает при обработке очень острых углов на малых толщинах заготовки.

Разработке стратегий компенсации погрешностей формообразования, вызванных прогибом проволочного электрода, посвящены работы ряда авторов [17–20]. Принципы управления ЭЭВО понятны – уменьшение прогиба и погрешности формообразования можно получить за счет снижения скорости реза, но при этом падает производительность процесса. Количественно определить баланс между производительностью и точностью формообразования препятствует

нерешенная до конца проблема определения реальной формы проволочного электрода в условиях конкретного технологического процесса.

Цель настоящей работы – разработать экспериментально-расчетную методику и получить уравнения для расчета величины распределенной внешней нагрузки, действующей на проволоку при резании определенных групп сталей и твердых сплавов, и позволяющие на этапе проектирования технологического процесса рассчитать реальную форму проволочного электрода и с ее учетом строить технологию обработки и соответствующую траекторию движения приводов станка.

Задачи исследования:

1. Разработать методику определения реальной формы проволочного электрода при прямом резе полного съема.

2. Предложить математическую модель формы проволочного электрода под действием внешней нагрузки.

3. Определить уровень гидродинамических сил, действующих на проволоку, вызванных потоком жидкости промывки с использованием модельной ячейки системы промывки межэлектродного промежутка (МЭП).

4. Используя результаты измерений максимальных прогибов проволоки и математическую модель формы проволочного электрода под действием внешней нагрузки, получить уравнения для расчета величины распределенной внешней нагрузки, действующей на проволоку при резании определенных групп сталей и твердых сплавов.

5. Экспериментально проверить уровень адекватности полученных уравнений.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследуемые материалы и оборудование, используемые в эксперименте

Исследования физико-технологических параметров электроэрозионной проволочной резки осуществлялись на электроэрозионном вырезном станке СЭЛД-02 производства НПО «РОТОР», г. Черкассы, Украина. В качестве приводов использованы линейные двигатели, гранитные направляющие, опоры с газовой смазкой, обеспечивающие минимальную погрешность перемещения. Тракт перемотки проволоки снабжен сглаживающими компенсаторами и вместе с V-образными направляющими минимизирует вибрации проволочного электрода.

Применялись два режима черного резания генератора ГКИ 300-200А. Характеристики импульсов: номинальная частота импульсов 22 кГц, длительность импульса 3 мкс, амплитуда

тока при нагрузке 0,1 Ом 170 и 250 А. Продольное натяжение проволоки варьировалось в пределах 6–8 Н, давление промывки $2,5 \cdot 10^5$ и $5 \cdot 10^5$ Па.

Проволочные электроды диаметрами 0,20 и 0,15 мм Cobra Cut B (AGIE, Швейцария), твердая латунь CuZn37; диаметром 0,15 мм Fanuc – Norm (Matra) фирмы Fanuc (Япония), полутвердая латунь CuZn37; диаметром 0,25 мм Electra (ООО «Меганом», Украина), мягкая латунь Л63.

Материалы заготовок для электроэрозионной резки – сталь конструкционная (сталь 45), сталь инструментальная углеродистая (У8), сталь жаропрочная низколегированная (15ХМ). Толщина заготовок – 5, 10, 20, 30, 40, 50 мм. А также твердые сплавы (ВК-8, ВК-20), толщина заготовок – 5, 10, 20, 30 мм.

Методики определения показателей прогибов проволочного электрода

Экспериментальные измерения максимальных величин прогибов проволочного электрода проводились непосредственно на станке. На пробном резе отключались силовые импульсы с МЭП и подавались на него низковольтные маломощные зондирующие импульсы. После этого отключалась система промывки, сливалась рабочая жидкость и проволочный электрод отводился от стенки паза обрабатываемой детали до исчезновения контакта между ними по регистрации момента исчезновения силовых искровых разрядов на приборах станка. При этом вычислялась разность координат конечной точки внедрения и точки исчезновения контакта. Величина максимального прогиба определялась из выражения:

$$f = j - e,$$

где e – величина межэлектродного зазора; j – разность координат точки внедрения и точки исчезновения контакта.

Величина e определялась на станке посредством касания проволочным электродом стенок обрабатываемого паза, а также при подаче на проволоку маломощных зондирующих импульсов.

Таким образом, с погрешностью, не превышающей суммы погрешностей измерительной системы станка и диаметра проволоки, измерялась величина максимального прогиба проволочного электрода.

Методика определения полной формы проволочного электрода по всей высоте реза заключалась в следующем (рис. 1). Сначала производился черновой рез полного съема с максимальной интенсивностью искровых разрядов соответственно выбранному технологическому

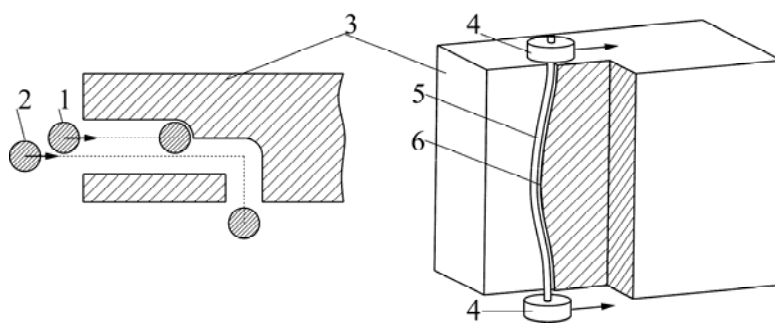


Рис. 1. Определение реальной формы прогибов проволочного электрода (масштаб не выдержан): 1 – первый черновой рез полного съема; 2 – второй рез со смещением; 3 – заготовка; 4 – направляющие; 5 – проволочный электрод; 6 – измеряемая линия прогибов.

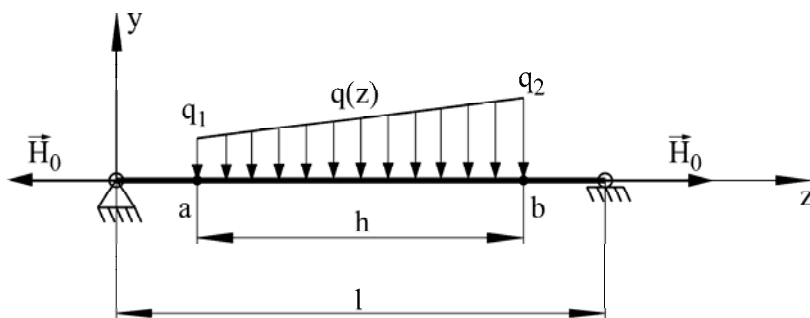


Рис. 2. Расчетная схема прогибов проволочного электрода при разных скоростях движения точек (a) и (b): l – расстояние между узлами фиксации проволоки; h – высота обрабатываемой детали; \vec{H}_0 – растягивающее натяжение нити; $q(z)$ – распределенная поперечная нагрузка.

режиму (позиция 1). При определенной глубине врезания процесс останавливался. Затем осуществлялся второй рез со смещением в сторону, ровно наполовину ширины реза (позиция 2), с помощью которого отсекалась часть заготовки. В результате появлялась возможность измерения кромки, представляющей собой серединную линию первого реза. Координаты линии прогибов (позиция б) снимались с помощью двухкоординатного измерительного микроскопа ДИП-3. Затем осуществлялся пересчет данных в форму проволочного электрода с учетом величины межэлектродного зазора. Оптическое наведение на измеряемую кромку позволяет определить координаты с погрешностью, не превышающей $\pm(1,0 + L/200)$ мкм, где L – измеряемый размер в миллиметрах.

Математическая модель формы проволочного электрода

Для определения прогибов проволочного электрода в общем случае при четырехкоординатной ЭЭВО использована математическая модель, в которой электрод представлен в виде гибкой нити (рис. 2), работающей только на растяжение, то есть отсутствует изгибная жесткость и растягивающие напряжения всегда направлены по касательной к нити.

Дифференциальное уравнение, описывающее форму проволочного электрода, имеет вид:

$$\frac{d^2 y}{dz^2} = \frac{q(z)}{H_0}. \quad (1)$$

Пространственно-временное распределение искровых разрядов дает обоснование представить силы от действия искровых разрядов в виде распределенной нагрузки с использованием следующего выражения:

$$q(z) = \begin{cases} 0, & z < a; \\ q_1 + \frac{z-a}{b-a}(q_2 - q_1), & a \leq z \leq b; \\ 0, & z > b. \end{cases} \quad (2)$$

В частности, при $q_1 = q_2$ получаем случай двухкоординатной ЭЭВО, когда проволочный электрод движется без отклонения от вертикального положения.

Решение уравнения (1) с учетом нагрузки (2) имеет вид:

$$y(z) = \frac{l}{2H_0} \left\{ \frac{z}{l} [q_1((l-a)^2 - (l-b)^2) + \frac{q_2 - q_1}{3(b-a)} ((l-a)^3 - (l-b)^3)] - q_1((z-a)^2 - (z-b)^2) - \frac{q_2 - q_1}{3(b-a)} ((z-a)^3 - (z-b)^3) \right\}, \quad (3)$$

где необходимо положить $(z-a) = 0$, при $z < a$ и $(z-b) = 0$, при $z < b$.

Формула (3) дает возможность рассчитать прогиб проволочного электрода в любом произвольном сечении.

Разработанная модель использовалась в работе в качестве «обратной задачи». Применяя экспериментально измеренную форму проволочного электрода, по математической модели определяли действовавшую распределенную поперечную нагрузку для конкретных технологических условий электроэрозионного резания.

Экспериментально-расчетная методика оценки гидродинамических сил, вызванных потоком жидкости промывки

Большинство разработчиков электроэрозионных вырезных станков используют коаксиальную промывку межэлектродного зазора для удаления продуктов эрозии из зоны обработки и интенсификации охлаждения проволочного электрода. Применяются различные конструкции встроенных сопел, обеспечивающих прокачку рабочей жидкости, как правило, одновременно снизу и сверху, вдоль оси проволочного электрода. Вследствие этого возникает поперечная распределенная силовая нагрузка, вызванная гидродинамическим сопротивлением проволоки потоку рабочей жидкости промывки. Величина нагрузки определяется скоростью поперечного обтекания проволоки и зависит от геометрических параметров прорезаемого паза и давления рабочей жидкости в верхнем и нижнем плечах гидросистемы станка.

Силовая нагрузка вызвана падением давления ΔP между передней режущей и задней поверхностями проволочного электрода. Потери напора определяются по формуле Вейсбаха:

$$\Delta P = \xi \frac{\rho V^2}{2}, \quad (4)$$

где $\xi = \frac{33}{Re}$ – коэффициент сопротивления прямоугольной щели; Re – число Рейнольдса; V – скорость потока жидкости; ρ – плотность жидкости.

Число Рейнольдса для щелевого зазора можно определить по формуле:

$$Re = \frac{V \cdot C}{\mu}, \quad (5)$$

где $C = \frac{\delta \cdot h}{2 \cdot (h + \delta)}$ – отношение площади проходного сечения к смоченному периметру; δ – минимальный размер сечения выхода рабочей жидкости из межэлектродного промежутка; h – высота реза; μ – кинематическая вязкость рабочей жидкости.

Из (4) и (5) находим скорость потока жидкости, обтекающей проволочный электрод:

$$V = \frac{\Delta P \cdot \delta \cdot h}{33 \cdot (h + \delta) \cdot \rho \cdot \mu}. \quad (6)$$

Для экспериментального определения $\Delta P = P_1 - P_2$ использовалась модельная ячейка системы промывки (рис. 3).

Для измерения давления использовался манометр ИПДЦ-89007 с пределами измерений от 0 до 10 кПа и допускаемой погрешностью $\pm 0,07\%$.

Через блоки измерительных каналов регистрировалось рабочее давление жидкости P_1, P_2 в различных сечениях, вдоль высоты прорезаемого паза. Далее по уравнению (6) можно рассчитать скорость потока и расход жидкости, прокачиваемой через межэлектродный промежуток.

Для давления промывки $P_a, P_b \leq 8 \cdot 10^5$ Па число Рейнольдса всегда меньше, чем $2 \cdot 10^5$. Гидродинамическое сопротивление проволочного электрода можно рассчитать по формуле для цилиндра в потоке жидкости:

$$F_{hydr} = C_x \cdot W \cdot \frac{\rho \cdot V^2}{2} = q_0 \cdot h, \quad (7)$$

где $W = d \cdot h$ – характерное сечение (мидель проволоки); d – диаметр проволоки; C_x – коэффициент сопротивления цилиндра с осью, перпендикулярной потоку, который для чисел Рейнольдса $Re \leq 2 \cdot 10^5$ принимают равным 1,2.

Следовательно, исходя из формул (6), (7), можно определить поперечную распределенную нагрузку q_0 , действующую на проволочный электрод:

$$q_0 = 0,6 \cdot d \cdot \frac{1}{\rho} \cdot \left(\frac{\Delta P \cdot \delta \cdot h}{33 \cdot (h + \delta) \cdot \mu} \right)^2. \quad (8)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Цель серии экспериментальных исследований – установить взаимосвязь между скоростью электроэрозионного резания V и распределенной нагрузкой q от действия электрических разрядов. Экспериментальные зависимости при резании разных марок сталей и твердых сплавов приведены на рис. 4. Различные скорости первого чернового реза получали при обработке разных толщин заготовок. Для технологических условий каждого эксперимента измерялся максимальный прогиб проволочного электрода и по формуле (3) проводился расчет распределенной нагрузки, вызвавшей отклонение электрода.

Полученные данные для исследуемых сталей и твердых сплавов в пределах погрешности, не превышающей 6%, аппроксимированы линейной функцией (прямая 1, рис. 4):

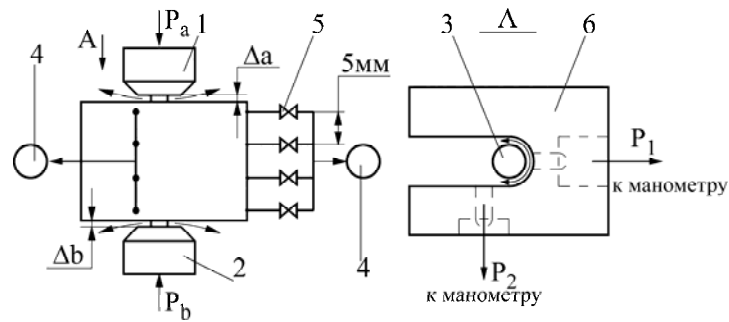


Рис. 3. Схема измерения давления рабочей жидкости вдоль длины прорезаемого паза: 1 – верхнее сопло промывки; 2 – нижнее сопло промывки; 3 – проволочный электрод; 4 – манометры; 5 – вентили каналов измерений; 6 – корпус установки; P_a , P_b – давление жидкости в верхней и нижней системах промывки; P_1 , P_2 – давление в передней части межэлектродного промежутка и на выходе из него; Δa , Δb – зазор между соплами промывки и корпусом.

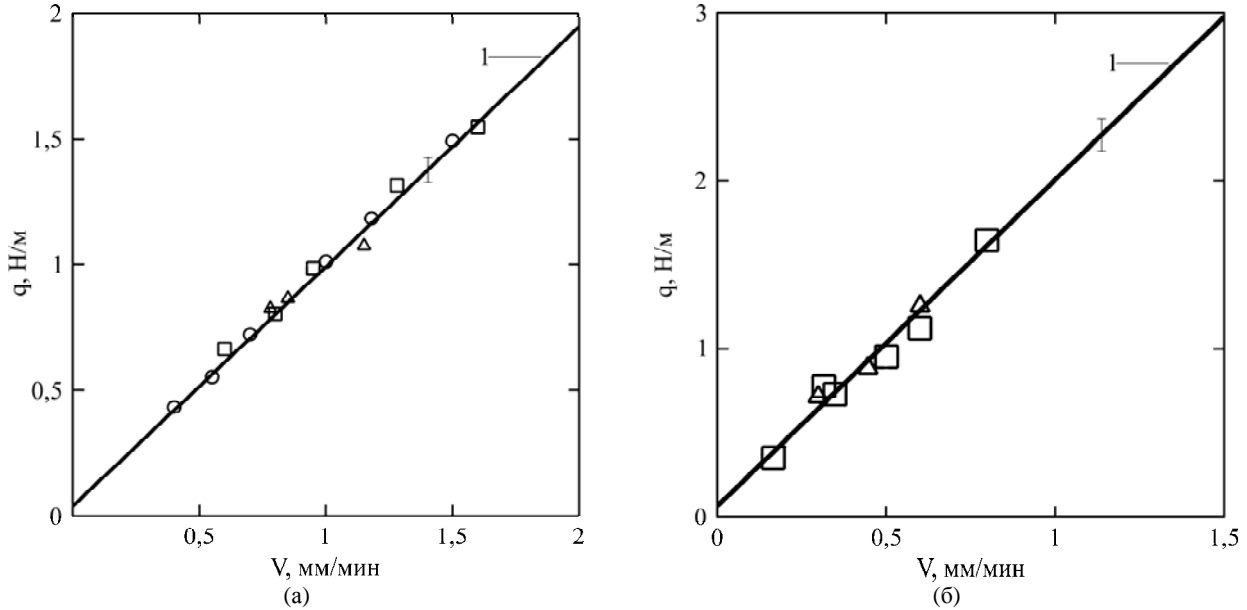


Рис. 4. Зависимость распределенной нагрузки на проволочный электрод диаметром 0,2 мм от скорости резания: (а) – сталей (○ – сталь 45, □ – У8, Δ – 15ХМ); (б) – твердых сплавов (□ – ВК8; Δ – ВК20).

$$q = k \cdot V + q_0, \quad (9)$$

причем для сталей:

$$q_{st} = 0,953 \cdot V + 0,025, \quad (10)$$

для твердых сплавов:

$$q_{tc} = 1,94 \cdot V + 0,04. \quad (11)$$

Результаты экспериментальных исследований влияния величины зазора между соплом промывки и деталью на величину ΔP приведены на рис. 5. Измерения проводились при давлении на выходах из сопел $P_a = P_b = 5 \cdot 10^5$ Па и $\Delta a = \Delta b$.

Как видно из рис. 5, при уменьшении зазора до 0 величина ΔP , а следовательно, и скорость промывки зазора увеличиваются. Однако при этом повышается вероятность потери точности и брака через смещения направляющих из-за усилий контакта подвижного сопла с заготовкой. Поэтому целесообразно выставлять зазор, равный $\Delta a = \Delta b = 0,02-0,05$ мм, позволяющий избегать прямых механических контактов сопла и заготовки и существенных потерь расхода рабочей жидкости через межэлектродный

промежуток. В дальнейшем все исследования проводились при $\Delta a = \Delta b = 0,02-0,05$ мм.

Иной конструктивный вариант состоит в применении подпружиненных выходных частей сопел, которые полностью ложатся на поверхность заготовки.

Результаты измерения распределения ΔP по высоте паза для толщин 20, 45 и 100 мм и давления в гидросистеме станка $P_a = P_b = 2,5 \cdot 10^5$ Па и $P_a = P_b = 5 \cdot 10^5$ Па представлены на рис. 6.

Во всех экспериментах наблюдается уменьшение ΔP от нижней и верхней поверхностей заготовки к середине паза, а следовательно, в этих направлениях существует градиент скорости поперечного обтекания проволочного электрода. Коаксиальная промывка при одинаковых условиях прокачки сверху и снизу образует в сечениях, близких к середине заготовки, «застойную зону», в которой скорость промывки МЭП минимальная, а тепловая нагрузка на проволочный электрод максимальная. Разница ΔP между крайними и средним сечениями увеличивается с ростом толщины

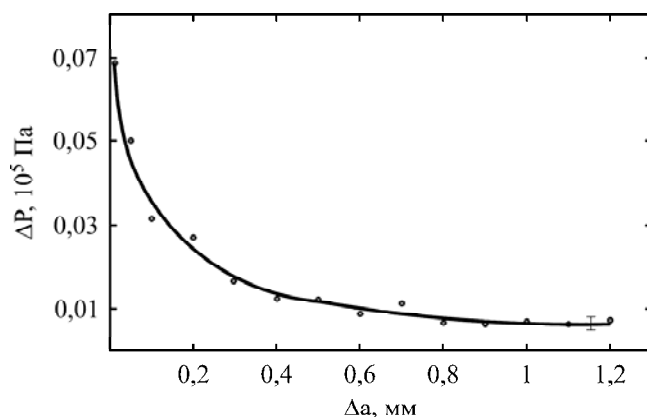


Рис. 5. Зависимость падения давления рабочей жидкости между передней и задней поверхностями проволочного электрода от зазора между соплом и корпусом детали.

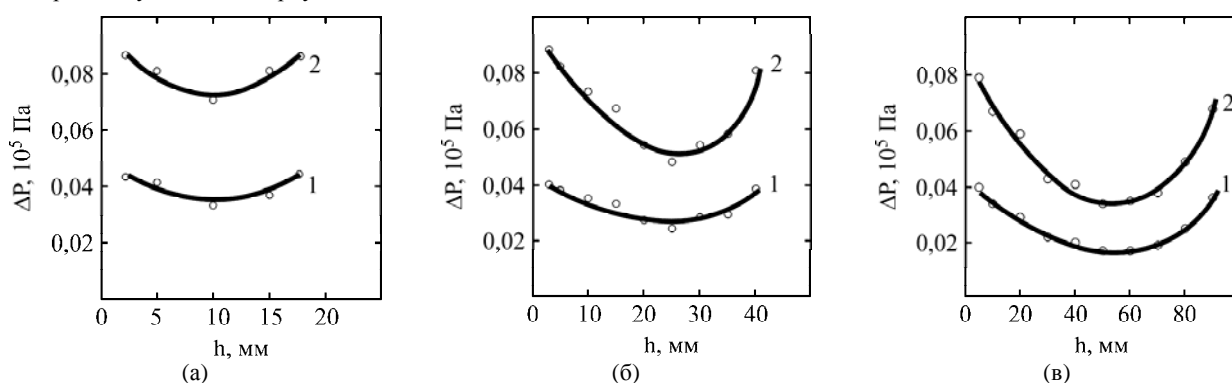


Рис. 6. Распределение падения давления рабочей жидкости по высоте для различных толщин разрезаемых заготовок: 1 – $P_a = P_b = 2,5 \cdot 10^5$ Па; 2 – $P_a = P_b = 5 \cdot 10^5$ Па; (а) $h = 20$ мм; (б) $h = 45$ мм; (в) $h = 100$ мм.

заготовки, что объясняет уменьшение производительности резания при $h > 50$ мм.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

Из графика на рис. 4а следует, что при обработке стали 45 и различных марок сталей с одинаковыми скоростями величины распределенных нагрузок отличаются незначительно. То же самое можно сказать и о твердых сплавах. Следовательно, нет необходимости получать зависимость (9) отдельно для каждой марки исследуемой стали или твердого сплава, так как их отличия не превышают 2–6%.

Этот факт можно объяснить тем, что электроэрозионная обрабатываемость (зависимость интенсивности эрозии от свойств материала) внутри групп исследованных сталей и твердых сплавов отличается незначительно. Эрозионная обрабатываемость твердых сплавов примерно в 2 раза хуже, чем у сталей, что и вызывает увеличение более чем на 100% электродинамических нагрузок на проволоку при тех же скоростях резания. Учитывая то, что эрозионная обрабатываемость материалов зависит от их теплофизических параметров (теплопроводности, теплоемкости, температур плавления и испарения), результаты экспериментов можно исполь-

зовать для определения q при обработке других сталей и твердых сплавов, теплофизические параметры которых не отличаются более чем на 10–15% от параметров исследованных материалов.

Достоверность последнего утверждения и работоспособность моделей были экспериментально проверены при резании стали 30ХГСА толщиной 25 и 45 мм, а также твердого сплава ВК10 толщиной 15 и 25 мм. Различия теплофизических констант данных материалов от ранее исследованных не превышают 10%. Установлено, что величины максимальных прогибов проволочного электрода на указанных толщинах отличались от расчетных значений на 0,006–0,015 мм (см. таблицу), что составляет 4–5%.

Также в ходе экспериментов было проведено измерение полной формы проволочного электрода по вышеуказанной методике. Установлено, что теоретически рассчитанная форма по формуле (3) и экспериментально измеренные координаты прогибов не отличаются более чем на 9% по всей высоте прорезанного паза.

Теоретическая оценка величины поперечной нагрузки на проволочный электрод по формулам (4)–(8) и полученные значения вследствие аппроксимации экспериментальных данных

Сравнение экспериментальных и расчетных значений прогиба проволочного электрода

Материал	Толщина, мм	Диаметр проволоки, мм	Максимальный прогиб проволоки, мм (расчет)	Максимальный прогиб проволоки, мм (эксперимент)	Расхождение эксперимента и расчета, %
30ХГСА	25	0,2	0,160	0,152	5,2
30ХГСА	45	0,2	0,213	0,207	2,8
ВК-10	15	0,2	0,233	0,244	4
ВК-10	25	0,2	0,293	0,308	4,8

(10), (11) показывают, что усилия, вызванные течением жидкости, на порядок меньше нагрузки от действия искровых разрядов. Отличие последних слагаемых в (10) и (11) можно объяснить разной толщиной отложений продуктов эрозии на боковых стенках прорезаемого паза. При обработке твердого сплава более интенсивно происходит обратный перенос латуни из проволочного электрода на поверхность детали и значительно сужается сечение выхода потока промывки из МЭП.

По разработанной экспериментально-расчетной методике можно составить базы данных для определения точной формы проволочного электрода при обработке других групп материалов, в том числе вновь получаемых сплавов. Результаты служат основой для проектирования технологического процесса ЭЗВО с применением систем автоматизированного проектирования. При проектировании обработки сложноконтурных деталей следует учитывать изменение интенсивности разрядов (нагрузки) в процессе обхода углов и при движении по дугам окружностей. Используя количественные геометрические параметры формы получаемой детали, можно целенаправленно применять методы компенсации влияния прогибов проволочного электрода на точность обработки и формообразования поверхности.

ВЫВОДЫ

1. На основании комплекса экспериментальных и теоретических исследований предложена расчетно-экспериментальная методика и получены уравнения для расчета величины распределенной внешней нагрузки, действующей на проволоку при резании определенных групп сталей и твердых сплавов. Полученные результаты позволяют на этапе проектирования технологического процесса рассчитать истинную форму проволочного электрода и с ее учетом строить технологию обработки и соответствующую траекторию движения приводов станка.

2. Разработана математическая модель формы проволочного электрода под действием внешней нагрузки.

3. Разработана модельная ячейка системы промывки МЭП. Расчетно-экспериментальным путем выполнена оценка уровня гидродинамических сил, действующих на проволоку и вызванных потоком жидкости промывки.

4. Экспериментальная проверка показала, что при использовании предложенной расчетно-экспериментальной методики для резания материалов, теплофизические константы которых не отличаются от ранее исследованных более чем на 10%, теоретически рассчитанные и экспериментально измеренные координаты прогибов не отличаются более чем на 9% по всей высоте прорезанного паза.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ставицкий Б.И. *Из истории электроискровой обработки материалов*. Харьков: ЦентрИнформ, 2013. 104 с.
2. Klocke F., Garzón M., Dieckmann J., Klink A. *Prod Eng*. 2011, **5**(2), 183–190.
3. Takayama Y., Makino Y., Niu Y., Uchida H. *Procedia CIRP*. 2016, **42**, 623–626.
4. Sanchez J., Rodil J., Herrero A., de Lacalle L. et al. *J Mater Process Technol*. 2007, **182**(1), 574–579.
5. Dauw D., Beltrami I. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*. 1994, **43**(1), 193–197.
6. Beltrami I., Bertholds A., Dauw D. *J Mater Process Technol*. 1996, **58**(4), 385–389.
7. Firouzabadi H.A., Parvizian J., Abdullah A. *Int J Adv Manuf Technol*. 2015, **76**, 447–459.
8. Selvakumar G., Sarkar S., Mitra S. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: J of Engineering Manufacture*. 2012, **226**(10), 1694–1704.
9. Chen Z., Huang Y., Zhang Z., Li H. et al. *Int J Adv Manuf Technol*. 2014, **74**(5–8), 917–929.
10. Sanchez J., Plaza S., Ortega N., Marcos M. et al. *Int J Mach Tools Manuf*. 2008, **48**(12), 1420–1428.
11. Plaza S., Ortega N., Sanchez J., Pombo I. et al. *Int J Adv Manuf Technol*. 2009, **44**(5–6), 529–538.
12. Puri A., Bhattacharyya B. *Int J Mach Tools Manuf*. 2003, **43**(2), 151–159.
13. Sarkar S., Sekh M., Mitra S., Bhattacharyya B. *Precis Eng*. 2011, **35**(2), 339–347.
14. Okada A., Konishi T., Okamoto Y., Kurihara H. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*. 2015, **64**(1), 233–236.

15. Kawata A., Okada A., Okamoto Y., Kurihara H. *Key Eng Mater.* 2017, **749**, 130–135.
16. Dodun O., Gonçalves-Coelho A.M., Slătineanu L., Nagîț G. *Int J Adv Manuf Technol.* 2009, **41**(9–10), 858–864.
17. Han F., Zhang J., Soichiro I. *Precis Eng.* 2007, **31**(4), 331–336.
18. Huang Q.H. *Appl Mech Mater.* 2014, **536**, 1452–1455.
19. Hsue W., Liao Y., Lu S. *Int J Mach Tools Manuf.* 1999, **39**(4), 651–667.
20. Hsue A.W.-J., Su H.-C. *J Mater Process Technol.* 2004, **149**(1), 117–123.

Summary

The results of experimental and theoretical studies of creation of experimental calculation methods for determining the magnitude of a distributed external load acting on a wire during electrical discharge machining of certain groups of steels and hard alloys are presented. The reliability of the obtained results, operability of equations and models are confirmed experimentally. Their usage for designing a technological process allows to calculate the true shape of a wire electrode and, thus, to offer a machining technology and the corresponding machine drives trajectory.

Keywords: wire electrical discharge machining, sparking rate, wire-electrode deflection, surface formation.