

УДК 621.9.048.4- 621.9.048.6

М.Г. Акопян, канд. техн. наук, асист.

Национальный политехнический университет Армении (Гюмрийский филиал),
Армения

mar_hakobyan@mail.ru

ВЛИЯНИЕ ВЯЗКОСТИ РАБОЧЕЙ СРЕДЫ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ УДАЛЕНИЕ ПРОДУКТОВ ЭРОЗИИ ПРИ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ

В статье представлена зависимость течения рабочей среды в межэлектродном промежутке при электроэррозионной обработки на производственные показатели процесса. В частности показана возможность расчета значения течения рабочей среды в процессе электроэррозионной обработки. Интенсивностью течения обусловлены, эффективность охлаждения и удаления продуктов эрозии из зоны обработки, и как следствие погрешности формообразования качества поверхности и производительность. Значение течения зависит от вязкости рабочей среды и перепада давления, следуя из представленной модели.

Ключевые слова: электроэррозионная обработка, вязкость, течение, математическая модель.

1. Введение

Все физические процессы, сопутствующие электроэррозионной обработке (ЭЭО), протекают в межэлектродном промежутке (МЭП), заполненном рабочей средой (диэлектриком), которая непрерывно прокачивается под достаточно высоким давлением и оказывает влияние на все стадии электроэррозионного процесса. Рабочая среда, ее свойства, течение играют важную роль на всех стадиях ЭЭО [1]. Рабочая среда одновременно осуществляет и охлаждение рабочей зоны, и удаляет продукты эрозии с зоны обработки, следовательно, ее вязкость и теплопроводность имеют существенное влияние на технологию ЭЭО. В предыдущих работах представлены результаты получения рабочих сред с промежуточными физическими и электрическими свойствами [2,3]. В данной работе представлено как конкретно вязкость рабочей среды повлияет на течение среды, следовательно, и эффективность удаления продуктов эрозии из МЭП, одновременно, уменьшая или исключая погрешности формообразования.

При формировании пробоя МЭП диэлектрической среды определяет время формирования токопроводящих частиц в «мостик», по которому происходит пробой рабочей среды. На время и путь формирования мостика так же влияют диэлектрическая проницаемость и вязкость рабочей среды [1,4]. Жидкости оказывают сопротивление относительному движению (сдвигу) ее частиц, этим и обусловлена вязкость среды. Силы внутреннего трения, проявляются только при движении жидкости благодаря наличию сил сцепления между ее молекулами.

ЭЭО является сложным физическим процессом, и вследствие сложности внедрения измерительных приборов непосредственно в зону обработки ее экспериментальное исследование затруднено. Однако процесс ЭЭО можно представить в виде совокупности отдельных процессов, протекание которых подчиняется

известным физическим законам, каждый из которых можно описать с помощью математических моделей [5].

С увеличением вязкости рабочей среды степень захвата продуктов эрозии увеличивается и процесс удаления их улучшается. Однако, если межэлектродный зазор мал, то движение вязкой рабочей среды затруднено, и процесс удаления ухудшается. Следовательно, выбор рабочей среды для ЭЭО должен производиться основательно и с учетом всех требуемых критериев [1]. Наиболее распространенные рабочие жидкости являются вода и углеводородные среды. В предыдущих работах представлены результаты получения соответствующих эмульсионных рабочих сред с требуемыми промежуточными свойствами, и для каждого вида обработки применяют оптимальные рабочие жидкости [6,7]. При электроэррозионном процессе с малой энергией импульса высокую производительность обработки обеспечивает дистиллированная и техническая вода, керосин; при грубых режимах на электроимпульсном режиме применяют тяжелые фракции нефти с высокой температурой вспышки. При прошивании глубоких отверстий основной задачей является поддержание процесса и его интенсификация при значительном внедрении электрода-инструмента в заготовку, когда условия эвакуации продуктов обработки из МЭП затруднены, т.к. каналы обработки являются узкими щелями. Режимы течения и теплопереноса рабочей жидкости в этих каналах существенно отличаются от процессов, протекающих в каналах большого размера. В связи с небольшими размерами щели, одним из важнейших факторов, оказывающих решающее влияние на процессы ЭЭО, теплопереноса, становится микрогеометрия поверхности канала и интенсивность течения рабочей среды в МЭП и ее вязкость.

2. Задача исследования

При прошивании отверстия частицы продуктов эрозии, двигаясь между уже обработанной поверхностью детали и образующей поверхностью электрода-инструмента, вызывают дополнительные электрические разряды, что ведет к возникновению конусности.

Для решения данной проблемы используют прокачку или отсос рабочей жидкости, а также станки с автоматическим выводом электрода-инструмента (релаксацией) из отверстия для очистки его от продуктов эрозии. Схема принудительной прокачки рабочей среды в процессе прошивки глубоких щелей существенно отличается от схемы ее прокачки при проволочной резке. При прошивке, если обрабатываемая деталь находится в танке с жидкостью, то давление может составить до 8 атмосфер, а в проливных моделях станков – до 4-6 атмосфер.

В случае использования принудительной прокачки рабочей жидкости, всем частицам продуктов эрозии придается импульс, направление которого совпадает с направлением прокачки. Однако и при прошивке и проволочной резке общим является то, что как для первого случая, так и для второго размер МЭП, по сравнению с обрабатываемыми поверхностями, значительно меньше, что следует учесть построении модели течения рабочей среды.

Влияние скорости потока рабочей среды в МЭП на точность формообразования при ЭЭО была подтверждена экспериментально. В качестве изменяемого параметра использовалась скорость V потока рабочей среды в МЭП при постоянных значениях напряжения U , подаваемого на электроды.

Скорость потока, помимо принудительно подаваемого импульса, зависит от

- вязкости рабочей среды (которая преимущественно является функцией от температуры канала)
- геометрии и микрографии канала.

Вязкость рабочей среды имеет особое значение на стадии удаления продуктов эрозии и продуктов распада из зоны разряда. С увеличением вязкости степень захвата продуктов эрозии увеличивается, улучшая процесс их удаления. Однако при малом МЭП движение вязкой рабочей среды будет затруднено и процесс удаления ухудшится, приведя к дефектам заготовки вследствие возникновения дуговых разрядов. На чистовых режимах ($Rz = 80 \text{ мкм}$) следует использовать рабочие среды малой вязкости не выше $(1,8-3) \times 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$, так как межэлектродный зазор мал, на черновых режимах эффективны среды, имеющие кинематическую вязкость $(5-6) \times 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$. Кинематическая вязкость среды измеряется при температуре 20°C .

Неравномерность поверхности и изменения ее геометрии и микрографии приведут к неравномерности потока в канале, вследствие, перепадов давления рабочей среды в ней, а шероховатость песчинок является основным параметром, определяющим трение при ламинарном и турбулентном течении. Для упрощения расчета канал в инструменте принимался бесконечно узким.

Как известно погрешность формообразования вычисляется по формуле:

$$\Delta = \frac{s_{\text{факт}} - s_{\text{ном}}}{s_{\text{ном}}} ,$$

где $s_{\text{факт}}$ - количество фактически удаленного материала со стенок прошиваемого отверстия; $s_{\text{ном}}$ - номинальное (расчетное) количество материала, которое должно быть удалено со стенок прошиваемого отверстия, а $s_{\text{ном}} = 2h * \delta$, где h - высота прошиваемого отверстия; δ - расчетная величина пробивного зазора.

3. Математическая модель расчетов

В основе математического моделирования течения сплошной рабочей среды в МЭП лежит дискретная математическая модель канала с заданной поверхностями и его стенок, где высоты неровностей $h_1(x,y)$ и $h_2(x,y)$ задаются в виде расстояния от неровности до средней плоскости. Высота средней плоскости вычисляется как среднее арифметическое высот неровностей, и представляются согласно ГОСТ 2789-73 как расстояние от средней линии профиля до неровности. Значения h_1 и h_2 могут быть получены и для реальных поверхностей и искусственным моделированием.

Средний зазор между поверхностями H принимается как расстояние между средними плоскостями неровностей. Координаты стенок канала в выбранной системе отсчета, и текущий зазор вычисляются как:

$$H_1(x,y) = -\frac{H}{2} + h_1(x,y), H_2(x,y) = \frac{H}{2} - h_2(x,y)$$

$$h_T(x,y) = H_2(x,y) - H_1(x,y) = H - h_1(x,y) - h_2(x,y)$$

Как известно гидродинамика макроскопически описывается уравнением Навье-Стокса [5]. Оно показывает, каким будет давление, плотность и скорость жидкости в каждой точке пространства в каждый момент времени — в зависимости от начальных и граничных условий и параметров среды, где скорость потока зависит от разности давлений и вязкости. Как уже отмечали, размер зазора между поверхностями канала безгранично мал, по сравнению с ее шириной и длиной, следовательно, можем рассматривать канал в виде двух бесконечных параллельных плоскостей, которые расположены на малом расстоянии, и течение несжимаемой жидкости постоянной вязкости в этом случае описывается полной системой уравнений Навье-Стокса:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial v_x}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_x}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \vartheta \left(\frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial z^2} \right) \\ \frac{\partial v_y}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_y}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_y}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \vartheta \left(\frac{\partial^2 v_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial z^2} \right) \\ \frac{\partial v_z}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_z}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_z}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \vartheta \left(\frac{\partial^2 v_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right), \\ \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0 \end{array} \right. , \quad (1)$$

где $p(x, y, z)$ - поле давлений; $\mathbf{v}(x, y, z)$ - поле скоростей; $\vartheta = \mu/\rho$ - коэффициент кинематической вязкости; μ - коэффициент динамической вязкости; ρ - плотность.

Течение сплошной среды происходит в плоскостях, параллельных границам потока, следовательно скорость $v_z = 0$. Для линеаризации уравнений ускорения не учитываются. При стационарном течении система уравнений имеет вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial p}{\partial x} = \mu \left(\frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial z^2} \right) \\ \frac{\partial p}{\partial y} = \mu \left(\frac{\partial^2 v_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial z^2} \right) \\ \frac{\partial p}{\partial z} = 0 \\ \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} \right) = 0 \end{array} \right. , \quad (2)$$

Учитывая, что рабочая среда имеет определенную вязкость (на поверхности канала будет наблюдаться прилипание), граничные условия компонентов скорости следующими:

$$v_x = v_y = 0, \text{ если } z = H_1, z = H_2 \quad (3)$$

Давление является функцией от x, y а производная по x от y обеих частей первого уравнения системы, по y – от второго уравнения той же системы и, сложив результаты, получим уравнение Лапласа для определения $p(x, y)$:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} = 0, \quad (4)$$

Из уравнений (2) и граничных условий (3), и соотношения (4) можно убедиться:

$$\begin{aligned} v_x(z) &= \frac{1}{2\mu} \frac{\partial p}{\partial x} z(z - h_T) \\ v_y(z) &= \frac{1}{2\mu} \frac{\partial p}{\partial y} z(z - h_T) \end{aligned} \quad (5)$$

Из уравнений (2) можно получить:

$$\frac{\partial}{\partial x} \int_0^{h_T} v_x dz + \frac{\partial}{\partial y} \int_0^{h_T} v_y dz = 0$$

Учитывая соотношение (5):

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\int_0^{h_T} \frac{1}{2\mu} \frac{\partial p}{\partial x} z(z - h_T) dz \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\int_0^{h_T} \frac{1}{2\mu} \frac{\partial p}{\partial y} z(z - h_T) dz \right) = 0$$

Интегрируя, получается уравнение для стационарного течения рабочей среды в МЭП, обусловленным разностью давлений:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(h_T^3 \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(h_T^3 \frac{\partial p}{\partial y} \right) = 0$$

Границыми условиями являются перепады давления $p_A - p_B$.

Следовательно, представленная модель учитывает разность давления и вязкость рабочей среды. Конкретно численное решение данной системы уравнений осуществляется методом конечных элементов.

4. Основные результаты работы

Приведенная математическая модель позволяет рассчитать скорость течения - имея в качестве граничных условий перепады давлений и вязкость рабочей среды. Следовательно, выбирая, или вырабатывая рабочие среды с определенной вязкостью можно рассчитать скорость течения, которая будет в МЭП. Нами был разработан план экспериментов, на основе которых были получены следующие результаты вязкости

водно-углеводородных эмульсий полученных при различных режимах ультразвукового эмульгирования. Для совмещения положительных свойств каждого из двух жидкостей были получены масловодяные эмульсии разных концентраций компонентов. Эмульгирование проводилось методом ультразвукового эмульгирования воды и керосина с добавлением эмульгатора-касторового масла. Незначительное количество касторового масла (примерно 10%) в составе межэлектродной среды существенного влияния не будет иметь на ее технологические свойства. И вода, и керосин в отдельности являются межэлектродными рабочими средами для электроэррозионной обработки и их свойства и характеристики детально исследованы. Приведем краткое описание нового ингредиента полученной эмульсии. Касторовое масло имеет следующие характеристики: высокое содержание рицинолевой кислоты (не менее 80%) определяет свойства касторового масла: повышенную кинематическую вязкость (при 50°C более $110 \times 10^{-6} \text{ м}^2/\text{s}$) и плотность (при 15°C $950\ldots974 \text{ кг}/\text{м}^3$), в отличие от остальных растительные жирных масел – хорошую растворимость в спирте и плохую в бензине[X]. Из-за незначительной разности плотностей касторового масла и воды они седиментационно (кинетически) устойчивы. Касторовое масло отличается очень низкой коррозийной активностью к материалам электрод-инструмента и обрабатываемой заготовки, экологичностью. Ультразвуковое эмульгирование воды, керосина и касторового масла (в качестве эмульгатора) позволяет получить высокодисперсные, практически однородные и химически чистые эмульсии.

Соотношение пропорций, при котором формируется эмульсия с оптимальными свойствами, которая может использоваться как межэлектродная рабочая среда при электроэррозионной обработке - 45 % вода, 45 % керосин, 10 % касторовое масло [2].

Однако в эмульсии коалесценция носит самопроизвольный характер и сопровождается укрупнением капель эмульсии и уменьшением свободной энергии системы. В жидкой дисперсионной межэлектродной среде коалесценцию часто предшествует коагуляция. В процессе коагуляции происходит слипание частиц коллоидной системы при их столкновениях в ходе броуновского движения, перемешивания или направленного перемещения (при подаче эмульсии в межэлектродное пространство эрозионной обработки) во внешнем силовом поле. При коагуляции в эмульсии образуются более крупные (вторичные) частицы, состоящие из скопления более мелких (первичных). В таких скоплениях первичные частицы соединены силами межмолекулярного взаимодействия непосредственно или через прослойку окружающей (дисперсионной) среды. Процесс коагуляции эмульсии сопровождается непрерывным укрупнением частиц и уменьшением их числа в объеме дисперсионной жидкой среды. При этом прогрессирующей скоростью происходит увеличение размера и массы агрегатов. Установлена зависимость вязкости формируемой эмульсии от продолжительности ультразвуковых колебаний (рис. 1). Имея данным требуемую вязкость, можно будет подобрать соответствующие режимы эмульгирования, для ее обеспечения. Амплитуда ультразвука была 36 мкм.

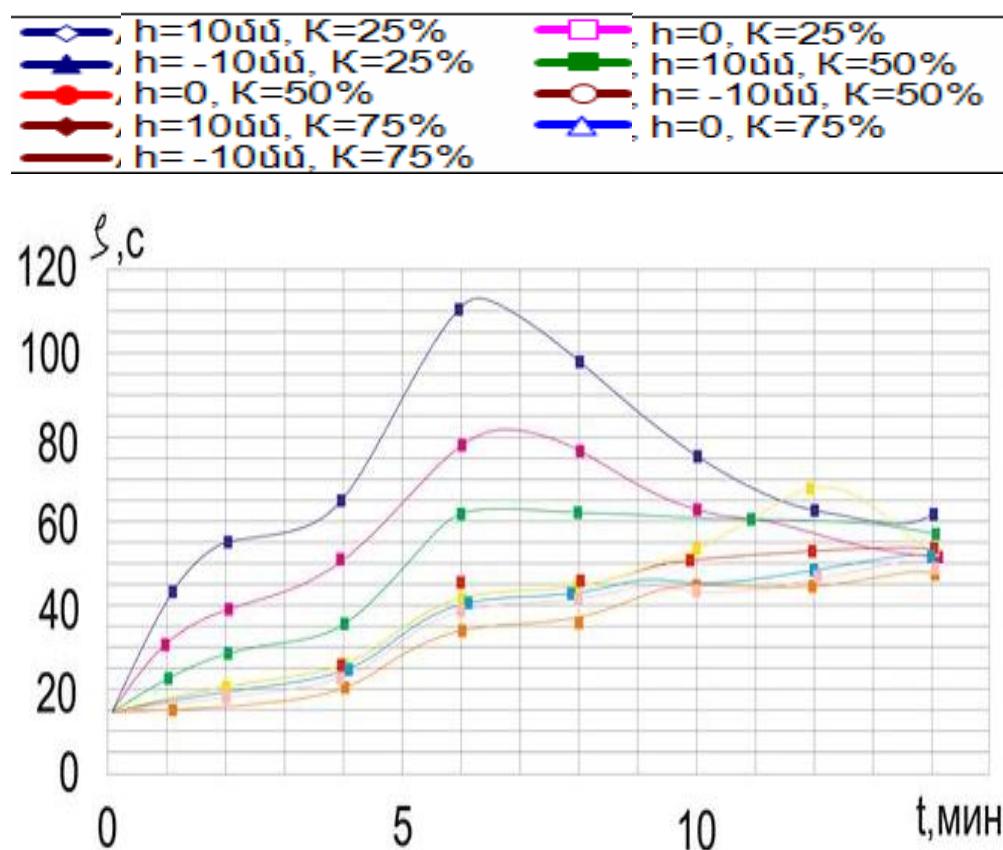


Рис. 1. Зависимость вязкости эмульсий от продолжительности УЗК

Эксперименты показали, что вязкость изготовленной эмульсии существенно выше вязостей основных компонентов.

С повышением температуры эмульсии снижается вязкость системы, увеличиваются подвижность дисперсной фазы и количество соударений дисперсных частиц среды. В зависимости от прочности двойного электрического слоя и знака заряда на его поверхности увеличение интенсивности соударений может привести к быстрому расслоению эмульсий или может послужить дополнительным фактором перемешивания и увеличения устойчивости эмульсий.

5. Заключение

Исходя из приведенной модели, и проведенных экспериментов и данных на их основе можно рассчитать для какого значения скорости течения, среду, с какой вязкостью следует выбрать, или получить. Следовательно, какие режимы ультразвукового эмульгирования следует выбрать для получения среды с требуемой вязкостью для последующего применения при ЭЭО с целью получения требуемой скорости течения рабочей среды в МЭП.

Список литературы:

- Артамонов Б.А. и др. Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов. Том 1. (Обработка материалов с применением инструмента) - М.: Высш. школа, 1983.-247 с.

2. Акопян М.Г., Христафорян С.Ш., Акопян Г.Г. Разработка водно-углеводородных сред для электроэррозионной обработки // Международный сб. науч. тр. "Прогрессивные технологии и системы машиностроения".- Донецк, 2008.- Вып. 35.- С. 17-21.
3. Акопян М.Г. Ультразвуковой метод подготовки специальных сред для электроэррозионной обработки // Вестник – 75 ГИУА (Политехник): Сб. научных и методических статей.- Ереван, 2008.-Ч.1.- С. 234 -236.
4. Акопян М.Г. О возможности повышения устойчивости эмульсий и их использования при электроэррозионной обработке // Сборник материалов Международной научно-технической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов "Прогрессивные направления развития машино-приборостроительных отраслей и транспорта - 2008".- Севастополь, 2008. –Т. 1.- С. 108-109.
5. Деги Д.В., Старченко А.В. Численное решение уравнений Навье - Стокса на компьютерах с параллельной архитектурой // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2012. № 2. С. 88-98.
6. Акопян М.Г. Повышение эффективности электроэррозионной обработки применением ультразвука. Автореф. дис. канд. техн. наук.-Ереван, 2014.-22с.
7. Акопян М.Г., Мурадян А.Г. О возможности управления дисперсностью эмульсий, полученных при помощи ультразвуковых колебаний // Вестник ГИУА (Политехник): Сб. научных и методических статей. - Ереван, 2010. - Т.2, № 1. - С. 105-107.

Надійшла до редколегії 02.12.2014.

M.G. Hakobyan

INFLUENCE OF VISCOSITY OF THE MEDIUM ON THE EFFICIENCY REMOVAL OF PRODUCTS OF EROSION DURING ELECTRICAL DISCHARGE MACHINING

The article shows the dependence of the current working environment in the electrode gap with electrical discharge treatment on production performance of the process. In particular the possibility of calculating the values of the current operating environment in the process of electrical discharge machining. Intensity due to flow, and the cooling efficiency of the removal of erosion products from the processing zone, and forming an error as a result of surface quality and productivity. The value depends on the viscosity of the flow fluid and the pressure differential resulting from the present model.

Keywords: electro-discharge machining, viscosity, flow, mathematical model.

М.Г. Акопян

ВПЛИВ В'ЯЗКОСТІ РОБОЧОЇ СЕРЕДОВИЩА НА ЕФЕКТИВНІСТЬ ВИДАЛЕННЯ ПРОДУКТІВ ЕРОЗІЇ ПРИ ЕЛЕКТРОЕРЗІЙНОЇ ОБРОБКІ

У статті представлена залежність перебігу робочого середовища в міжелектродному проміжку при електроерозійній обробці на виробничі показники процесу. Зокрема показана можливість розрахунку значення течії робочого середовища в процесі електроерозійної обробці. Інтенсивністю течії обумовлені, ефективність охолодження і видалення продуктів еrozії із зони обробки, і як наслідок похибки формоутворення якості поверхні і продуктивність. Значення течії залежить від в'язкості робочого середовища і перепаду тиску, слідуючи з представленої моделі.

Ключові слова: електроерозійна обробка, в'язкість, протягом, математична модель.