Наука и Образование МГТУ им. Н.Э. Баумана

Сетевое научное издание ISSN 1994-0408 Наука и Образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2016. № 11. С. 28–37.

DOI: 10.7463/1116.0850013

Представлена в редакцию: 14.10.2016 Исправлена: 28.10.2016

© МГТУ им. Н.Э. Баумана

УДК 621.9.048.4

Расчет параметров подачи рабочей жидкости через трубчатый электрод-инструмент при электроэрозионном прошивании отверстий малого диаметра

Ставицкий И. Б.^{1,*}

vats59@mail.ru

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

В статье представлены результаты исследований по определению параметров течения рабочей жидкости (РЖ) через трубчатый электрод-инструмент (ЭИ) при электроэрозионной прошивке (ЭЭП) отверстий малого диаметра. Показано, что известной из теории гидравлики традиционной методикой расчета расхода РЖ при течении в трубчатом ЭИ пользоваться крайне затруднительно, а результаты вычислений могут иметь существенную погрешность, что вызвано особенностями течения жидкости по капиллярному каналу ЭИ. В статье приводится полученная в результате проведенных исследований зависимость расхода РЖ (воды), протекающей через трубчатый ЭИ, от создаваемого давления РЖ на входе в ЭИ, внутреннего диаметра и длины этого ЭИ. Данная зависимость применима для расчетов при давлении воды до 15 МПа, длине ЭИ до 350 мм и его внутреннем диаметре от 0,08 до 0,3 мм и может применяться при расчете расхода РЖ или ее давления на входе в ЭИ для реального процесса ЭЭП отверстий малого диаметра трубчатым ЭИ.

Ключевые слова: электроэрозионная обработка, прошивание отверстий малого диаметра, трубчатый электрод-инструмент, прокачка рабочей жидкости, расход рабочей жидкости, давление рабочей жидкости

Введение

Электроэрозионная прошивка (ЭЭП) трубчатым электродом-инструментом (ЭИ) является на сегодняшний день одним наиболее эффективных методов изготовления отверстий малого диаметра в различных деталях. Метод позволяет получать отверстия диаметром от 0,3 мм на глубину до 100 и более диаметров прошиваемого отверстия с высокой производительностью и находит все большее применение в промышленности [1–5]. В последние годы на рынке возрастает количество производителей оборудования, реализующего этот процесс обработки. Однако для эффективного прошивания отверстий малого диаметра необходимо учитывать ряд особенностей, обусловленных малой площадью обработки, необходимостью интенсивного удаления продуктов эрозии и газов из зоны обработки, большой скоростью прокачки рабочей жидкости (РЖ) через межэлектродный промежуток (МЭП). Для оптимального протекания электроэрозионных процессов и, следовательно, высокой скорости прошивания необходимо обеспечить определенный расход РЖ через МЭП, которая подается в него через внутренний канал трубчатого ЭИ. При этом необходимый расход РЖ зависит от диаметра прошиваемого отверстия, диаметра внутреннего отверстия ЭИ, обрабатываемого материала, режимов обработки, состава РЖ. В настоящее время расход РЖ определяют, как правило, опытным путем и не корректируют в процессе обработки в связи с изменением длины ЭИ вследствие его интенсивного износа. В данной работе были получены расчетные соотношения для определения реального расхода РЖ, подаваемой через трубчатый ЭИ в МЭП, в зависимости от таких параметров, как длина трубчатого ЭИ, диаметр его внутреннего канала и давление РЖ на входе в него. Регулирование давления РЖ на входе в трубчатый ЭИ с учетом его длины и диаметра внутреннего канала, а также энергетических режимов обработки и диаметра прошиваемого отверстия позволит оптимизировать процесс прошивания отверстий малого диаметра и повысить производительность получения отверстий.

Определение параметров течения жидкости через трубчатый ЭИ

Рассмотрим течение РЖ при ЭЭП отверстий малого диаметра трубчатым ЭИ. Течение происходит по двум последовательным участкам: внутреннему каналу трубчатого ЭИ и кольцевому каналу, образованному наружной поверхностью трубчатого ЭИ и боковой поверхностью прошиваемого отверстия. Характер течения РЖ на обоих участках зависит от размеров поперечных сечений каналов, их длины, качества поверхности, давления на входе в трубчатый ЭИ и физических свойств РЖ.

Для расчета расхода РЖ прежде всего определим вид ее течения – ламинарное, переходное или турбулентное. Из гидродинамики известно [6], что характеристическим параметром, определяющим переход от ламинарного течения к турбулентному, является безразмерное число Рейнольдса, формула для расчета которого в данном случае имеет вид

$$\operatorname{Re} = V_{cp} d_{\kappa} / v, \qquad (1)$$

где V_{cp} – средняя скорость течения РЖ по трубчатому ЭИ; d_{κ} – внутренний диаметр трубчатого ЭИ; v – кинематическая вязкость РЖ.

При Re = 2300 начинается переход от ламинарного течения к турбулентному, обычно заканчивающийся при Re = 6000 [7]. Таким образом, для определения вида течения РЖ будем считать, что при Re < 2300 имеет месть ламинарное течение, при $2300 \le \text{Re} \le 6000 -$ переходная зона течения и Re > 6000 – турбулентное течение.

Если поперечное сечение канала не круглое, то вместо внутреннего диаметра d_{κ} необходимо использовать эквивалентный (гидравлический) диаметр, определяемый по формуле

$$d_m = 4S/P, \tag{2}$$

где *S* – площадь поперечного сечения канала ЭИ; *P* – смоченный периметр.

Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана

Используя формулу (2), для течения жидкости в кольцевом канале, образованном трубчатым ЭИ с наружным диаметром d_{3u} и диаметром прошиваемого отверстия D, найдем эквивалентный диаметр d_m :

$$d_m = D - d_{_{\rm SM}} \,. \tag{3}$$

Определим, какой вид течения жидкости имеет место в рассматриваемом случае ее движения по внутреннему каналу ЭИ. Рассмотрим в качестве РЖ воду, наиболее часто применяемую при ЭЭП отверстий малого диаметра трубчатым ЭИ. По формуле (1) были получены области ламинарного, переходного и турбулентного течений РЖ в зависимости от скорости течения РЖ и внутреннего диаметра ЭИ (рис.1).



Рис.1. Области течения РЖ (воды) в зависимости от критической скорости V течения и внутреннего диаметра dк трубчатого ЭИ.

Для определения средней скорости течения жидкости V_{cp} на вход трубчатого ЭИ подавали воду под давлением 5...12 МПа, длину ЭИ при этом варьировали от 50 до 350 мм, а их внутренний диаметр – от 0,08 до 0,3 мм. Пройденную по капиллярному каналу за определенное время *t* воду собирали и измеряли ее объем V_{px} . Среднюю скорость течения вычисляли по формуле:

$$V_{\rm cp} = V_{\rm pw} / (t S). \tag{4}$$

Сопоставление экспериментальных скоростей с рассчитанными по формуле (1) (см. рис.1) критическими скоростями показало, что на рассматриваемом участке существуют все виды течений жидкости – ламинарное, переходное и турбулентное. Следует отметить,

что в переходной области течение жидкости может быть неустойчивым, возможны пульсации перепада давления, характеристик теплообмена и т.д.

Рассчитать необходимое давление на входе в трубчатый ЭИ по заданному расходу жидкости или скорости ее течения можно по формуле Дарси– Вейсбаха [8]:

$$\Delta p = \lambda (L/d_{\kappa}) \rho (V_{\rm cp}^{2}/2g), \qquad (5)$$

где Δp – перепад давлений в трубчатом ЭИ; λ - коэффициент сопротивления по длине ЭИ; L – длина ЭИ; ρ – плотность жидкости. В случае течения жидкости по кольцевому каналу вместо параметра d_{κ} в формуле (5) следует использовать эквивалентный диаметр d_m , рассчитанный по формуле (3).

Коэффициент сопротивления λ в зависимости от типа течения определяют по формуле Пуазейля (для ламинарного течения) или Альтшуля (для переходного и турбулентного течений) [9]:

$$\lambda_{\pi} = 64/\text{Re},\tag{6}$$

$$\lambda_{\rm n,r} = 0.11 (K_{\rm m}/d_{\rm K} + 68/{\rm Re})^{0.25},\tag{7}$$

где $K_{\rm m}$ – эквивалентная равнозернистая абсолютная шероховатость канала трубчатого ЭИ, мм.

Значения коэффициента K_m определяют из справочных таблиц, например [9]. Для трубчатых ЭИ из цветных металлов и сплавов K_m принимают равным 0,0015 мм [9].

Для ламинарного течения жидкости формула (5) с учетом (6) имеет вид:

$$\Delta p_{\pi} = 32 \mu L V_{\rm cp} / d_{\kappa}^2, \qquad (8)$$

где μ – динамическая вязкость жидкости, $\mu = v\rho$.

Для турбулентного и переходного течений формула (5) с учетом (7) будет следующей:

$$\Delta p_{\rm T,\Pi} = 0.55 \left(K_{\rm m} / d_{\rm K} + 68 / V_{\rm cp} \, d_{\rm K} \right)^{0.25} \rho L V_{\rm cp}^{2} / d_{\rm K} \,. \tag{9}$$

Очевидно, что описанной выше традиционной методикой расчета давления РЖ на входе в трубчатый ЭИ пользоваться крайне неудобно, так как необходимо предварительно определить вид течения жидкости, который по мере износа ЭИ (изменения его длины) может быть как турбулентным, так и ламинарным или переходным. Кроме того, как показали эксперименты, погрешность вычисления по формулам (8) и (9) перепада давлений относительно реальных значений может существенно отличаться. Вероятно, такое большое расхождение объясняется малым внутренним диаметром трубчатого ЭИ, а также наличием капиллярного эффекта. Поэтому формулы (8) и (9) рекомендуется использовать только для качественной оценки влияния различных параметров на необходимое давление РЖ на входе в трубчатый ЭИ, а для более точного определения его значений пользоваться эмпирическими формулами, полученными в результате проведенных в представленной работе исследований.

Согласно формуле (8), при ламинарном течении давление жидкости на входе в трубчатый ЭИ пропорционально его длине, а также скорости течения жидкости и обратно пропорционально квадрату внутреннего диаметра ЭИ. Поэтому для уменьшения потерь давления в трубчатом ЭИ необходимо следующее:

Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана

- увеличить внутренний диаметр ЭИ. Однако это возможно только до некоторого предельного значения, определяемого энергией импульсов. В противном случае будет образовываться неудаляемый отход в виде стержня, остающегося внутри трубки и, как показали эксперименты, резко снижающего расход РЖ и нарушающего стабильность процесса ЭЭП (рис.2);
- 2) уменьшить длину ЭИ;
- 3) снизить динамическую вязкость РЖ, например с помощью различных добавок. Однако этот путь требует проведения дополнительных экспериментальных исследований, так как добавки могут изменить объем удаляемого за один электрический разряд материала, увеличить газообразование в процессе обработки, а значит, повлиять на производительность процесса ЭЭП.



Рис.2. Неудаляемый отход

Уменьшать скорость течения РЖ недопустимо, так как при этом снижается ее расход через МЭП.

При турбулентном и переходном течениях влияние внутреннего диаметра трубчатого ЭИ на давление РЖ на входе несколько уменьшается, а влияние скорости – возрастает.

В результате проведенных экспериментов была получена эмпирическая зависимость, позволяющая рассчитать расход РЖ в зависимости от внутреннего диаметра трубчатого ЭИ, его длины и давления на входе. Обработку экспериментальных данных проводили по методу наименьших квадратов [10] на ЭВМ. В результате была получена зависимость

$$Q = 1,025 \cdot 10^5 d_{\kappa}^{2,42} L^{-0,528} p^{0,735}, \qquad (10)$$

где Q – расход РЖ через трубчатый ЭИ, мм³/с; d_{κ} – в мм; L – в мм; p – давление РЖ на входе в трубчатый ЭИ, МПа.

Расхождение экспериментальных данных с аппроксимационной кривой построенной по формуле (10), не превышает 15 %. На рис. 3 представлена расчетная зависимость расхода РЖ (воды) от длины трубчатого ЭИ при различных давлениях РЖ на входе в ЭИ и внутренних диаметрах ЭИ. Там же приведены экспериментальные значения расхода РЖ.



Рис.3 Зависимость расхода Q РЖ (воды) от длины L трубчатого ЭИ при $d_{\kappa} = 0,145$ мм (сплошные линии) и $d_{\kappa} = 0,09$ мм (штриховые линии), а также при p равном 10 (1), 7,5 (2), и 5 МПа (3). Точки – экспериментальные значения.

Отметим, что все теоретические и экспериментальные данные относительно расхода РЖ были получены при ее течении в отсутствии искровых разрядов. В свою очередь, искровые разряды и различные сопровождающие их явления, такие как ударные волны, газовые полости, реактивный выброс материала и т.д., вероятно, способны вызвать некоторое дополнительное гидравлическое сопротивление. Поэтому для проверки этого предположения были проведены дополнительные эксперименты.

В заготовке перпендикулярно оси прошиваемого отверстия было выполнено боковое отверстие. В процессе прошивки вся РЖ, проходящая через ЭИ и МЭП, удалялась через это отверстие и собиралась в отдельной емкости (рис. 4). Измеряя объем РЖ, поступившей в емкость за определенное время, можно определить ее расход через МЭП для реальных условий ЭЭП в зависимости от глубины прошиваемого отверстия.

Экспериментальные данные показали, что расход РЖ по мере углубления в заготовку не меняется, а объем испарившейся и разложившейся в процессе обработки РЖ пренебрежимо мал по сравнению с объемом, проходящим через МЭП. Кроме того, расход РЖ в реальных условиях ЭЭП равен расходу РЖ через трубчатый ЭИ при отсутствии обработки. Условия течения РЖ по кольцевому каналу, образованному наружной поверхностью ЭИ и внутренней поверхностью изготавливаемого отверстия, на расход РЖ через МЭП практически не влияют. Это можно объяснить тем, что площадь сечения кольцевого канала существенно превышает площадь сечения капилляра ЭИ.



Рис.4. К определению расхода РЖ для реальных условий ЭЭП

Диаметр капилляра, чтобы исключить образование неудаляемого отхода в заготовке, не должен превышать двух МЭП, соответствующих применяемым режимам обработки. Поэтому диаметр капилляра ЭИ, как правило, составляет 0,09...0,3 мм. При этом кольцевой зазор между наружной поверхностью ЭИ и поверхностью прошиваемого отверстия равен одному МЭП (0,05 ... 0,15 мм). Как показывают расчеты, для рассматриваемого диапазона прошиваемых отверстий площадь сечения кольцевого канала превышает площадь сечения капилляра ЭИ в 6...18 раз. Поэтому гидравлическое сопротивление на этом участке течения РЖ по сравнению с сопротивлением в капилляре мало. Основным фактором, препятствующим течению жидкости по этому участку, является масса РЖ, находящейся в кольцевом канале. Причем с увеличением глубины прошиваемого отверстия влияние этого фактора возрастает. Однако для случая принудительной прокачки РЖ через МЭП влияние этого фактора на расход РЖ также крайне мало и им можно пренебречь.

Таким образом, формула (10) может быть применена при расчете расхода РЖ или ее давления на входе в ЭИ для реального процесса ЭЭП трубчатым ЭИ.

Заключение

В результате проведенных исследований была получена зависимость расхода РЖ (воды) протекающей через трубчатый ЭИ от создаваемого давления на входе в ЭИ и внутреннего диаметра и длины этого ЭИ. Данная зависимость применима для расчетов при давлении воды до 15 МПа, длины ЭИ до 350 мм и при его внутреннем диаметре от 0,08 до

0,3 мм. Показано, что полученная зависимость может быть применена при расчете расхода РЖ или ее давления на входе в ЭИ для реального процесса ЭЭП трубчатым ЭИ.

Список литературы

- 1. Елисеев Ю.С., Саушкин Б.П. Электроэрозионная обработка изделий авиационнокосмической техники / Под ред. Б.П. Саушкина. М.: Изд-во МГТУ им Н.Э. Баумана, 2010. 437 с.
- 2. Серебреницкий П.П. Современные электроэрозионные технологии и оборудование. 2-е изд. СПб.: Лань, 2013. 351 с.
- Ali S., Hinduja S., Atkinson J., Pandya M. Shaped tube electrochemical drilling of good quality holes // CIRP Annals - Manufacturing Technology. 2009. Vol. 58. Iss. 1. Pp. 185-188. DOI: <u>10.1016/j.cirp.2009.03.070</u>
- 4. Pichai Janmaneea, Apiwat Muttamaraa. A study of hole drilling on stainless steel AISI 431 by EDM using brass tube electrode // International Transaction Journal of Engineering, Management, Applied Sciences and Technologies. 2011. Vol. 2. No. 4. Pp. 471-484.
- 5. Смоленцев В.П., Кириллов О.Н., Владыкин А.В., Юхневич С.С. Интенсификация процесса электроэрозионной прошивки отверстий малого диаметра // Вестник Воронежского гос. техн. ун-та. 2014. Т.10. № 1. С. 27-29.
- 6. Чугаев Р.Р. Гидравлика. 4-е изд. Л.: Энергоиздат, 1982. 671 с.
- 7. Крейт Ф., Блэк У. Основы теплопередачи: пер. с англ. М.: Мир, 1983. 511 с. [Kreith F., Black W.Z. Basic heat transfer. N. Y. etc., 1980].
- 8. Справочник по гидравлическим расчетам / Под ред. П.Г. Киселева. 5-е изд. М.: Энергия, 1974. 313 с.
- 9. Альтшуль А.Д. Гидравлические сопротивления. 2-е изд. М.: Недра, 1982. 224 с.
- 10. Древаль А.Е., Зеленцова Н.Ф., Колобаев Л.И. Математическая обработка результатов эксперимента с применением ЭВМ / Под ред. В.Н. Подураева. М.: МВТУ, 1986. 35 с.

Science Education of the Bauman MSTU Electronic journal

ISSN 1994-0408

Science and Education of the Bauman MSTU, 2016, no. 10, pp. 28–37.

DOI: 10.7463/1116.0850013

Received:	14.10.2016
Revised:	28.10.2016

© Bauman Moscow State Technical Unversity

Calculating the Fluid Supply Parameters Through the Tubular Electrode in Electro-Discharge Sinking of Small Diameter Holes

I.B. Stavitskiy^{1,*}

*<u>vats59@mail.ru</u>

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Keywords: electrical discharge machining (EDM); electro-discharge sinking of small diameter holes; the tubular electrode; fluid supply; fluid consumption; fluid pressure

The article presents results of research for characterization of the working fluid (WF) flow through the tubular electrode (TE) in electro-discharge sinking (EDS) of small diameter holes.

For the optimum EDS processes and, consequently, high speed sinking of holes it is necessary to ensure a certain consumption of WF flow through the inter-electrode gap, which is fed in it through the inner channel of the tubular electrode. Currently, the WF consumption is determined, as a rule, from experiments, and during processing is not corrected due to TE length change caused by its intense wear. To optimize the sinking process of small diameter holes and raise its speed there is a need to provide the WF pressure regulation at the TE inlet taking into consideration its length and the internal diameter of the channel and the power rates of processing and the diameter of holes as well.

The article shows that it is extremely difficult to use the known from the theory of hydraulics, traditional technique to calculate WF consumption flow in the TE, and the calculation results may have a significant error because of the features of TE capillary channel flow.

The paper gives the calculated relationship to determine the real consumption of WF fed through the TE into the inter-electrode gap, depending on parameters such as the TE length, diameter of its inner channel, and the WF pressure at the inlet therein. This relationship is useful for calculations at the water pressure of up to 15 MPa, TE length of up to 350 mm, and its inner diameter within 0.08 - 0.3 mm.

The paper shows that the obtained dependence can be used to calculate the WF consumption or its desirable pressure at the TE inlet in case of the real TE EDS process.

References

 Eliseev Yu. S., Saushkin B.P. *Elektroerozionnaia obrabotka izdelij aviatsionnokosmicheskij tekhniki* [Electrical discharge machining of aerospace engineering objects]. Moscow: MGTU, 2010. 437 p.

- 2. Serebrenitskij P.P. *Sovremennye elektroerozionnye tekhnologii i oborudovanie* [Contemporary EDM technology and equipment]. 2nd ed. S.-Petersburg: Lan' Publ., 2013. 351 p.
- Ali S., Hinduja S., Atkinson J., Pandya M. Shaped tube electrochemical drilling of good quality holesl. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 2009, vol. 58, iss. 1, pp. 185-188. DOI: <u>10.1016/j.cirp.2009.03.070</u>
- 4. Pichai Janmaneea, Apiwat Muttamaraa. A study of hole drilling on stainless steel AISI 431 by EDM using brass tube electrode. *International Transaction Journal of Engineering, Management, Applied Sciences and Technologies*, 2011, vol. 2, no. 4, pp. 471-484.
- Smolentsev V.P., Kirillov O.N., Vladykin A.V., Uhnevich S.S. Intensification of electrochemical broach process for small diameter holes. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta* [The Bulletin of Voronezh State Technical Univ.], 2014, vol.10, no.1, pp. 27-29.
- 6. Chugaev R.R. Gidravlika [Hydraulics]. 4th ed. Leningrad: Energoizdat Publ., 1982. 671 p.
- 7. Kreith F., Black W.Z. *Osnovy teploperedachi* [Basic heat transfer]. Moscow: Mir Publ., 1983. 511 p.
- Spravochnik po gidravlicheskim raschetam [Handbook of hydraulic calculations]. 5th ed. Moscow: Energiia Publ., 1974. 313 p.
- 9. Al'tshul' A.D. *Gidravlicheskie soprotivleniia* [Hydraulic resistance]. 2nd ed. Moscow: Nedra Publ., 1982. 224 p.
- Dreval' A.E., Zelentsova N.F., Kolobaev L.I. *Matematicheskaia obrabotka rezultatov* eksperimenta s primeneniem EVM [Mathematical processing of experiment results using computer]. Moscow: MVTU, 1986. 35 p.