МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

DOI: 10.26730/1999-4125-2018-4-5-15

УДК 621.9.047

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОГРАНИЧЕНИЯ В ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ПРОШИВКЕ ОТВЕРСТИЙ МАЛОГО ДИАМЕТРА

TECHNOLOGICAL LIMITATIONS IN THE ELECTROCHEMICAL DRILLING OF SMALL DIAMETER DEEP HOLE

Рахимянов Харис Магсуманович,
доктор техн. наук, профессор, e-mail: x.raximyanov@corp.nstu.ru,
Kh.M. Rakhimyanov, D.Sc. (Engineering), Professor,
Василевская Светлана Игоревна,
ст. преподаватель, e-mail: vasilevskay@corp.nstu.ru,
S.I. Vasilevskaya, Senior Lecturer,
Рахимянов Константин Харисович,
кандидат техн. наук, доцент, e-mail: raximyanov@corp.nstu.ru,
K.Kh. Rakhimyanov, Ph.D. (Engineering), Associate Professor

Новосибирский государственный технический университет 630073, Россия,
г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20.
Novosibirsk State Technical University, Faculty of Mechanical Engineering and Technologies,
630073 Prospect K. Marx, 20, Novosibirsk, Russia.

Аннотация: *Актуальность формообразования малых отверстий объясняется интенсивным развитием машино – авиастроения, медицинской техники. Использование высокопрочных конструкционных материалов ограничивает возможности традиционных методов обработки, связанных с механическим резанием. Повышенное внимание к электрофизическим технологиям объясняется поиском путей решения этих задач. Однако, отсутствие технологических проработок в использовании электрофизических методов в микрообработке и определяет актуальность исследований в этом направлении. Специфика этих методов определяется совокупностью электро-физико-химических процессов, реализуемых в обработке. Многообразие взаимосвязанных параметров данных процессов не допускает упрощенных решений в назначении режимных параметров. Сложность экспериментальных подходов для их установления и предопределяет целесообразность теоретического исследования процессов для выявления имеющих место ограничений и поиска путей их устранения.*

В работе рассмотрены теоретические аспекты электрохимических процессов при обработке материалов и определена область режимных параметров при формообразовании отверстий. Установлено, что при прошивке малых отверстий полым катодом – инструментом возникают ограничения, связанные с потерей давления на местных сопротивлениях гидравлического тракта. Показано, что обеспечение точности формообразования по длине отверстия достигается при использовании схемы обработки с полым катодом – инструментом с электроизоляционным слоем на боковой поверхности. Теоретическими расчетами установлено, что наличие такого слоя на катоде – инструменте приводит к существенному ограничению области режимных параметров электрохимической прошивки.

На примере расчета схемы электрохимической прошивки отверстия в меди полым катодом – инструментом предложен алгоритм назначения режимных параметров на основе исходных требований чертежа к обрабатываемому отверстию.

Ключевые слова: *электрохимическая размерная обработка, межэлектродный зазор, гидравлический тракт, прошивка отверстий малого диаметра, медь, алгоритм назначения режимных параметров, катод – инструмент, точность формообразования, местные потери, технологические ограничения.*

Abstract: *The relevance of the small holes formation is explained by the intensive industry development, medical equipment improvement. The use of high-strength structural materials limits the possibilities of tradi-*

tional processing methods associated with mechanical dimensional processing. Special attention to electrophysical technologies is explained by the search for solutions to these problems. However, the lack of technological studies in the use of electrophysical methods in microprocessing determines the relevance of research in this direction. The specific feature of these methods is determined by the combination of electric-physical-chemical processes implemented in processing. The variety of interrelated parameters of these processes does not allow simplified decisions in the assignment of operating parameters. It is the complexity of the experimental approaches for their establishment that determines the feasibility of a theoretical study of processes to identify existing limitations and to find ways to eliminate them.

The paper discusses the theoretical aspects of electrochemical processes in the processing of materials and defines the range of operating parameters during the formation of holes. It is established that when small holes are drilled by a hollow cathode - tool, limitations arise due to the loss of pressure on the local resistances of the hydraulic path. It is shown that the accuracy of shaping along the hole length is achieved by using a processing scheme with a hollow cathode - tool with an electrical insulating layer on the side surface. It is established by theoretical calculations that the presence of such a layer on the cathode-tool leads to a significant limitation of the range of operating parameters of the electrochemical drilling.

The algorithm for assigning operating parameters based on the initial drawing requirements for the hole being processed is proposed as an example of the calculation of the electrochemical drilling scheme of a hole in copper by a hollow cathode – tool.

Key words: *electrochemical dimensional processing, interelectrode gap, hydraulic path, small-hole drilling, copper, algorithm for assigning operating parameters, cathode-tool, shaping accuracy, local losses, technological limitations.*

Введение

Необходимость дальнейшего развития и совершенствования технологии электрохимической обработки для формообразования поверхностей малых размеров, в том числе и отверстий, обусловлена потребностью решения как традиционных задач в машино – авиа - , автомобилестроении, так и в связи с интенсивным развитием техники медицинского назначения для выполнения высокотехнологичных хирургических операций, например, роботов [1 – 5]. Проблема формообразования глубоких отверстий малого диаметра усугубляется при использовании в качестве конструкционных материалов труднообрабатываемых металлов и сплавов. Последнее предопределяет выбор методов формообразования из класса электрофизических технологий, поскольку традиционные методы механического резания зачастую оказываются не приемлемыми для решения данных задач.

Из электрофизических технологий привлекательной для формообразования поверхностей в труднообрабатываемых материалах представляется электрохимическая размерная обработка. Имеет место широкая практика ее применения для обработки различных классов металлических материалов, в том числе и при прошивке глубоких отверстий [6 – 9]. Однако существующее оборудование, технологические рекомендации не относятся к обработке малых отверстий размером в десятые доли миллиметра [10].

Настоящая статья посвящена изучению возможностей электрохимической прошивки малых отверстий, выявлению технологических ограничений в формообразовании и поиску путей их устранения.

Постановка задачи

Значительное число факторов, влияющих на процесс электрохимической обработки, связанных как с электрохимическими свойствами обрабатываемого материала и рабочей среды – электролита, так и режимными параметрами, делает невозможным только экспериментальный подход в поиске оптимальных условий формообразования. Задача усложняется малыми размерами объекта исследования, а визуальное наблюдение за процессом обработки не дает необходимой информации для управления процессом. Поэтому анализ технологических возможностей электрохимической размерной обработки целесообразно проводить с использованием теоретического подхода в описании процессов, протекающих в межэлектродном зазоре.

Известное положение теории электрохимической обработки устанавливает взаимосвязь линейной скорости анодного растворения обрабатываемого металла с режимными параметрами процесса [9]:

$$V_{э.х.р.} = \frac{k \times \chi \times U \times \eta}{60 \times \Delta_T \times \gamma}, \text{ [см/мин]}, \quad (1)$$

где k - электрохимический эквивалент обрабатываемого металла, *г*/А×ч;

χ - удельная электропроводность электролита, ом$^{-1}$× см$^{-1}$;

U - технологическое напряжение, В;

η - выход обрабатываемого металла по току;

Δ_T- торцевой межэлектродный зазор, см;

γ - удельный вес обрабатываемого металла, *г*/см^3.

Выражение (1) отображает самоустанавлива-

ющийся характер анодного растворения обрабатываемого металла в условиях относительного движения электродов. Это означает, что в направлении движения одного из электродов устанавливается такая плотность тока, при которой скорость электрохимического растворения (Vэ. х. р.) становится равной подаче (S) электрода.

Для количественной оценки параметров электрохимического процесса необходимо определить рациональные диапазоны варьируемых в обработке режимных параметров. Учитывая факт, что такие параметры процесса как электрохимический эквивалент, удельный вес, выход по току имеют фиксированное значение для конкретных условий обработки, управление скоростью анодного растворения возможно при варьировании переменными параметрами – удельной электропроводностью электролита, технологическим напряжением и торцевым межэлектродным зазором. Согласно выражения (1) наибольшая скорость анодного растворения достигается в условиях максимальной локализации процесса (при минимально возможном значении Δ_T), максимально допустимом значении технологического напряжения и при использовании электролита с предельной концентрацией раствора. Ограничение технологического напряжения значением 20 В исключает возникновение электроэрозионных разрядов в межэлектродном зазоре, тем самым обеспечивая сохранность катода - инструмента и не ухудшая качество обрабатываемых поверхностей. Минимальное значение технологического напряжения, равное 5 В, определяется эффективностью развития процессов электрохимического растворения. Установление минимального значения величины торцевого межэлектродного зазора на уровне 0,025 мм связано с исключением появления аблитирации, препятствующей движению электролита в зоне обработки [7]. Ограничение максимального значения $\Delta_T = 0{,}1$ мм определяется стремлением максимального приближения диаметра формируемого отверстия к диаметру катода – инструмента. Существующие на практике электрохимической размерной обработки рекомендации по выбору электролитов для широкого круга металлов, конструкционных и инструментальных сталей [11, 12] позволили остановить выбор на водных растворах нейтральных солей. В качестве обрабатываемого материала использовалась медь марки М1 (ГОСТ 859 – 2001).

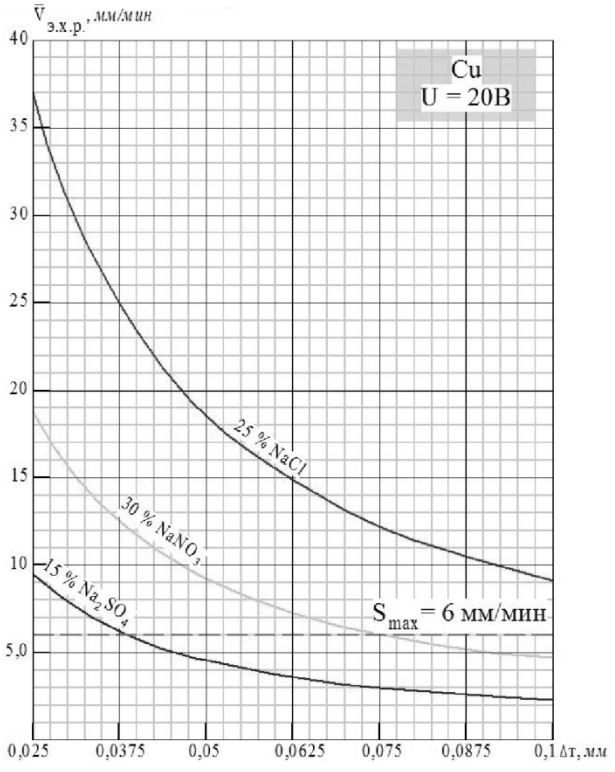

Рис. 1. Зависимость линейной скорости анодного растворения меди марки М1 от величины торцевого межэлектродного зазора при максимальном значении технологического напряжения (U = 20 В)

На рис. 1 представлена зависимость скорости анодного растворения меди М1 от величины торцевого межэлектродного зазора при обработке в водных растворах хлорида, нитрата и сульфата натрия предельных концентраций и максимальном значения технологического напряжения. Расчетные данные свидетельствуют о том, что максимальная скорость анодного растворения, равная 37 мм/мин, реализуется при обработке в 25 % NaCl на минимальном торцевом межэлектродном зазоре.

Необходимо учитывать, что при анодном растворении при больших плотностях тока в межэлектродном зазоре выделяется значительное количество тепловой энергии. Для установления теплового равновесия в зоне обработки необходимо прокачивать через межэлектродный зазор определенное количество электролита в единицу времени. Скорость прокачки также определяет эффективность удаления продуктов анодного растворения из зоны обработки. Недостаточная скорость потока электролита в межэлектродном зазоре не обеспечивает своевременной эвакуации продуктов анодного растворения и водорода, выделяющегося на катоде, и как следствие, увеличивается сопротивление в межэлектродном зазоре и снижается плотность тока. Чрезмерная скорость потока электролита приводит к возникновению кавитационных явлений, что наиболее характерно при обработке нежестким электродом, каким и является инструмент для прошивки глубоких отверстий малого диаметра.

Практикой электрохимической размерной обработки установлено, что она эффективна при турбулентном характере потока электролита с числом Рейнольдса 2400 – 4000, что соответствует скорости движения электролита 20 – 25 м/с [9]. Авторами работы [13] утверждается, что между величиной подачи электрода (скорости анодного растворения в условиях самоустанавливающегося процесса) и оптимальной скоростью прокачки электролита существует зависимость:

$$V_{ЭЛ} = 4 + 0{,}6S^2, \qquad (2)$$

где S – подача электрода, мм/мин;
$V_{ЭЛ}$- скорость прокачки электролита, м/с.

Соблюдение условия (2) при установленных значениях оптимальной скорости на уровне 20 – 25 м/сек потока электролита в рабочей зоне межэлектродного зазора ограничивает максимальное значение подачи (S) величиной 6 мм/мин. Электрохимическая обработка с максимальной скоростью анодного растворения (37 мм/мин) была бы возможна при прокачке электролита через торцевой межэлектродный зазор со скоростью 825 м/с, что неизбежно привело бы к возникновению кавитации и, как следствие, к сепарации потока, появлению, так называемых, «сухих зон» на электродах и нарушению стабильности электрохимического процесса. В связи с этим в последующих исследованиях область режимных параметров со стороны подачи ограничена значением 6 мм/мин (рис.1). Учитывая данное ограничение следует отметить, что использование 25% раствора NaCl в качестве электролита для обработки меди в установленных диапазонах значений торцевого межэлектродного зазора (0,025 – 0,1 мм), подачи (0 – 6 мм/мин) при значении технологического напряжения (U = 20 В) вообще не возможно. При прочих равных условиях использование 30 % раствора $NaNO_3$ обеспечивается только в определенном диапазоне значений торцевого межэлектродного зазора (0,075 – 0,1 мм).

Принимая во внимание вышеизложенное на рис. 2 показано положение кривых линейной скорости анодного растворения (подачи) для 20 % водного раствора $NaNO_3$ в установленном диапазоне технологического напряжения, которые и определяют границы области режимных параметров для данных условий.

При определенной информативности результатов, описывающих взаимосвязь линейной скорости анодного растворения в условиях относительного движения электродов с величиной торцевого межэлектродного зазора, соотношение (1) не учитывает гидродинамику потока электролита при его движении вдоль всего межэлектродного зазора (гидравлического тракта). Геометрия гидравлического тракта зависит от схемы электрохимической прошивки отверстия. Из существующих схем наибольшее распространение получила схема обработки полым катодом – инструментом с прокачкой электролита через центральное отверстие [7, 13]. Обеспечение точности формообразования по длине отверстия достигается нанесением электрической изоляции на боковую поверхность катода. На рис. 3 представлена схема электрохимической прошивки отверстия в обрабатываемом материале полым катодом - инструментом с электрической изоляцией боковой поверхности в условиях относительного движения электродов. На схеме показана геометрия и параметры формирующие гидравлический тракт: $D_{ОТВ}$ - диаметр обрабатываемого отверстия ($D_{ОТВ} = D_K + 2\Delta_Т$); D_K – диаметр катода – инструмента; d – диаметр отверстия катода; $\Delta_{ИЗ}$- толщина изоляционного слоя; l_K – длина катода – инструмента; $l_{ОТВ}$ – длина обрабатываемого отверстия; $\Delta_Т$- торцевой межэлектродный зазор, связанный с величиной подачи электрода (S) соотношением (1); $\Delta_Б$- боковой межэлектродный зазор, для данной кон-

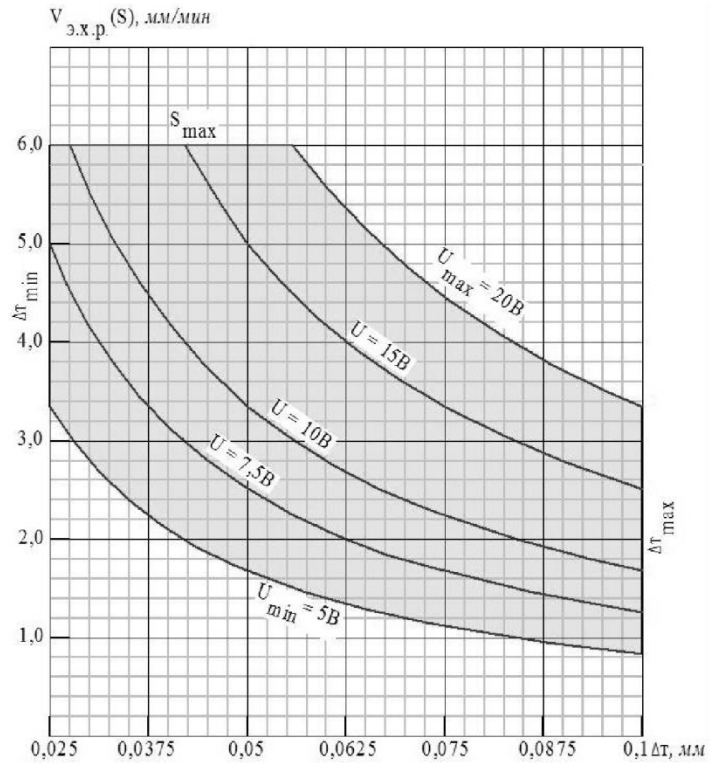

Рис. 2. Соотношение линейной скорости анодного растворения (подачи) меди М1 в 20%

водном растворе $NaNO_3$ от величины торцевого межэлектродного зазора в установленном

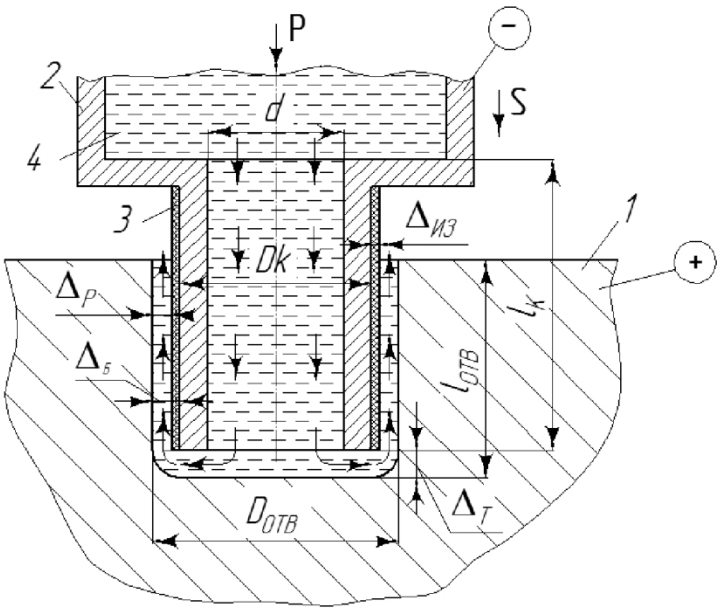

Рис. 3. Схема электрохимической прошивки и гидравлического тракта при

формообразовании отверстия полым катодом – инструментом с электрической изоляцией боковой поверхности: 1- обрабатываемый материал; 2 – полый катод – инструмент;

струкции катода – инструмента $\Delta_Б = \Delta_Т$; $\Delta_Р$ - рабочий межэлектродный зазор ($\Delta_Р = \Delta_Б - \Delta_{ИЗ}$); P – давление электролита на входе гидравлического тракта.

Для движения потока электролита вдоль гидравлического тракта необходимо создание на его входе определенного избыточного давления (P). Для конкретных геометрических размеров прошиваемого отверстия при использовании рассматриваемой схемы обработки, все параметры гидравлического тракта в течение обработки будут постоянными, за исключением длины обрабатываемого отверстия ($l_{ОТВ}$).

Гидравлический тракт на своем протяжении состоит из участков, имеющих различную площадь поперечного сечения, что и предопределяет переменность скорости потока электролита на его протяжении. На рис. 4 показана схема гидравлического тракта с указанием характеристических сечений и скоростей потока электролита. Изменение скорости на различных участках гидравлического тракта определяется условием неразрывности потока, которое в общем случае имеет вид:

$$V_i \times S_i = const, \qquad (3)$$

где V_i - скорость потока электролита в i – сечении гидравлического тракта;

S_i- площадь поперечного i – сечения.

Для схемы гидравлического тракта, представленной на рис. 4, выражение (3) может быть представлено как:

$$V_{ОПТ} \times F_O = V_1 \times F_1 = V_2 \times F_2 = V_3 \times F_3 = V_4 \times F_4 = V_5 \times F_5, \quad (4)$$

где $V_{ОПТ}$ - оптимальная скорость потока электролита в зоне анодного растворения, связанная с подачей соотношением (2);

$F_O = \pi \times d_0 \times \Delta_T$- площадь поперечного сечения в торцевом межэлектродном зазоре на диаметре $d_0 = \frac{D_K + d}{2}$;

V_1- скорость потока электролита при движении вдоль отверстия катода – инструмента;

$F_1 = \frac{\pi d^2}{4}$- площадь сечения в отверстии катода – инструмента;

V_2- скорость потока электролита на входе в торцевой межэлектродный зазор;

$F_2 = \pi \times d \times \Delta_T$ - площадь поперечного сечения тракта на входе в торцевой межэлектродный зазор;

V_3 - скорость потока электролита на выходе из торцевого межэлектродного зазора;

$F_3 = \pi(D_K + 2\Delta_{ИЗ}) \times \Delta_T$ - площадь поперечного сечения тракта на выходе из торцевого межэлектродного зазора;

V_4- скорость потока электролита на входе в боковой межэлектродный зазор;

$F_4 = \frac{\pi}{4}[(D_K + 2\Delta_T)^2 - (D_K + 2\Delta_{ИЗ})^2]$ - площадь поперечного сечения тракта на входе в боковой межэлектродный зазор;

V_5- скорость потока электролита на выходе из обрабатываемого отверстия;

F_5- площадь поперечного сечения тракта на выходе из обрабатываемого отверстия.

При прошивке отверстия изолированным катодом – инструментом $F_4 = F_5$, а$V_4 = V_5$.

Движение потока электролита вдоль гидравлического тракта в процессе электрохимической прошивки сопровождается общей потерей гидравлического давления из – за наличия местных сопротивлений, обусловленных изменением сечений потока, его поворотов и трения жидкости по ходу движения. Величина местных потерь в общем случае определяется зависимостью Вейсбаха [14]:

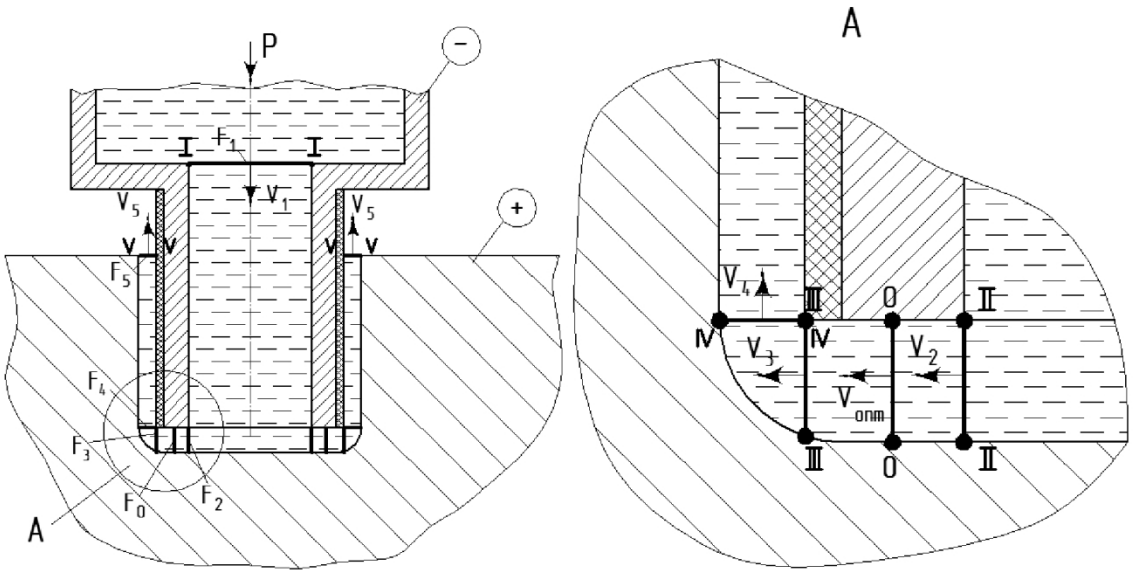

Рис. 4. Схема гидравлического тракта при электрохимической прошивке отверстия полым катодом – инструментом

$$\Delta P_i = \xi \times \frac{\rho \times V_i^2}{2}, \qquad (5)$$

где ΔP_i - местные потери давления, Па;

ξ - коэффициент местного гидравлического сопротивления;

ρ - плотность электролита, кг/м^3;

V_i - скорость движения электролита (после прохода через местное сопротивление), м/с.

В соответствии с представленной на рис. 4 схемой движения потока электролита суммарные потери на местных гидравлических сопротивлениях составят:

$$\sum \Delta P = \Delta P_{вх.} + \Delta P_{I-II} + \Delta P_{II-II} + \Delta P_{II-III} + \Delta P_{III-III} + \Delta P_{IV-V}, \quad (6)$$

где $\Delta P_{\text{вх}} = \xi_{\text{вх}} \times \rho \frac{V_1^2}{2}$ - потери давления электролита на входе в отверстие катода – инструмента; $\xi_{вх}$= 0,5 – коэффициент сопротивления вследствие сужения канала на входе в отверстие катода – инструмента;

$\Delta P_{I-II} = \lambda_{\text{ТР.ВН}} \times \left(\frac{l_{\text{К}}}{d}\right) \times \rho \frac{V_1^2}{2}$ - потери давления электролита на трение при его движении в отверстии катода – инструмента от сечения $I-I$ до сечения $II-II$; $l_{\text{К}}$ - длина катода, мм; d - диаметр отверстия катода – инструмента, мм; $\lambda_{ТР.ВН}$ = 0,04 – коэффициент сопротивления при трении электролита в отверстии катода – инструмента;

$\Delta P_{II-II} = \xi_{\text{ПОВ}} \times \rho \frac{V_2^2}{2}$ - потери давления электролита в сечении $II-II$; $\varsigma_{ПОВ}$ = 1,12 – коэффициент сопротивления при повороте потока электролита;

$\Delta P_{II-III} = \xi_{\text{РАСШ}} \times \rho \frac{V_3^2}{2}$ - потери давления электролита на участке $II-III$; $\varsigma_{РАСШ}$ = 0,1 – коэффициент сопротивления при расширении сечения;

$\Delta P_{III-III} = \xi_{\text{ПОВ}} \times \rho \frac{V_4^2}{2}$ - потери давления электролита в сечении $III-III$; $\varsigma_{ПОВ}$ = 1,12 – коэффициент сопротивления при повороте потока электролита;

$\Delta P_{IV-V} = \lambda_{\text{ТР.НАР.}} \times \left(\frac{l_{\text{ОТВ}}}{d_{\text{ЭКВ}}}\right) \times \rho \frac{V_4^2}{2}$ - потери давления электролита на трение при его движении по боковому межэлектродному зазору от сечения $IV-IV$ до сечения $V-V$;

$l_{\text{ОТВ}}$ - длина обрабатываемого отверстия, мм;

$d_{\text{ЭКВ}} = \sqrt{\frac{4F_4}{\pi}}$ - эквивалентный диаметр в сечении $IV-V$, мм; $\lambda_{ТР.НАР}$ = 0,03 – коэффициент сопротивления на трение электролита при его движении по боковому межэлектродному зазору.

Результаты расчета

Таким образом, на определенной стадии электрохимической прошивки суммарные потери ($\sum \Delta P$) на местных сопротивлениях гидравлического тракта станут равными величине избыточного давления (P) на его входе, что свидетельствует о достижении предельной глубины обработки отверстия. Расчет потерь в гидравлическом тракте в настоящих исследованиях и направлен на установление режимных параметров электрохимического процесса для достижения требуемой глубины прошивки. Решение данной задачи представлено на примере формообразования отверстия в меди полым катодом – инструментом с наружным диаметром D_K= 0,28 мм и диаметром отверстия d = 0,18 мм при толщине электроизоляционного слоя $\Delta_{\text{ИЗ}}$= 0; 0,02; 0,05 мм. Назначение в рас-

четах толщины $\Delta_{ИЗ}$= 0 мм условно и предназначено для установления отсчета при оценке влияния толщины слоя на гидродинамические процессы в обработке. Естественно, реальная толщина электроизоляционного слоя имеет конечное значение, при этом она должна быть меньше величины бокового межэлектродного зазора ($\Delta_Б$). В качестве электролита выбран 20 % водный раствор нитрата натрия при давлении на входе в гидравлический тракт P = 1,0 МПа. Расчеты проводились в установленной области режимных параметров Δ_T и S, представленной на рис. 2.

Результаты расчетов границ области режимных параметров, обеспечивающих электрохимическую прошивку отверстия глубиной более 0,1 мм представлены на рис. 5, а, в, д. Так на рис. 5, а показана область режимных параметров электрохимической прошивки при толщине электроизоляционного слоя катода - инструмента $\Delta_{ИЗ}$= 0 мм, границами которой являются: предельные значения торцевого межэлектродного зазора (Δ_{Tmin},Δ_{Tmax}), линейных скоростей анодного растворения для выбранного электролита при минимальном и максимальном значении технологического напряжения (U_{min},U_{max}) и линия соотношения подачи (S) и торцевого межэлектродного зазора (Δ_T), обеспечивающего электрохимическую прошивку отверстия глубиной 0,1 мм. Увеличение толщины электроизоляционного слоя до 0,02 мм изменяет положение границы, определяющей условия прошивки отверстия глубиной 0,1 мм (рис. 5, в), сокращая область режимных параметров в целом. При этом граница, определяемая величинойΔ_{Tmin} исчезает вообще.

Значительное сокращение области режимных параметров наблюдается при увеличении толщины электроизоляционного слоя до $\Delta_{ИЗ}$= 0,05 мм (рис. 5, д).

Если на рис. 5 а, в, д представлены области режимных параметров электрохимической обработки для прошивки отверстий более 0,1 мм, то на рис. 5 б, г, е показаны границы режимных параметров прошивки отверстий определенной глубины при разных толщинах электроизоляционного слоя на катоде – инструменте.

Так в области режимных параметров при $\Delta_{ИЗ}$= 0 мм границы достижимых глубин (l = 5, 20, 50 мм) как и граница минимальной глубины (l = 0,1 мм) представляют собой практически линейные зависимости подачи (S) и торцевого межэлектродного зазора (Δ_T) (рис. 5, б). Использование катодов – инструментов с толщиной электроизоляционного слоя $\Delta_{ИЗ}$= 0,02 мм (рис. 5, г) и $\Delta_{ИЗ}$= 0,05 мм (рис. 5, е) искажает линейную зависимость S и Δ_Tв зоне малых значений торцевого межэлектродного зазора.

Полученные данные свидетельствуют о том, что наличие гидродинамических потерь в межэлектродном зазоре существенным образом ограничивает область режимных параметров при электрохимической прошивке малых отверстий. Так формообразование отверстия глубиной 20 мм при выбранных условиях электрохимической прошивки катодом - инструментом с $\Delta_{ИЗ}$= 0,05 мм обеспечивается только в определенных интервалах значений торцевого межэлектродного зазора (Δ_T = 0,0625 – 0,1 мм) и подачи (S = 0,8 – 2,2 мм/мин). Установление соотношения значений Δ_T и S определяется следующим алгоритмом действий при назначении режимных параметров, графическая иллюстрация которого показана на рис. 6:

1. В соответствие с техническими требованиями чертежа устанавливается диаметр обрабатываемого отверстия (D_{OTB}).

2. Принимая во внимание диаметр катода – инструмента (D_K) определяется расчетное значение торцевого межэлектродного зазора $\Delta_T = \frac{D_{OTB}-D_K}{2}$.

3. Необходимо, чтобы расчетное значение Δ_T находилось в интервале значений, обеспечивающих достижение требуемой глубины обработки. При не выполнении условия необходима корректировка диаметра катода – инструмента.

4. По установленному значению Δ_T определяем соответствующее значение подачи S, причем сочетание этих параметров должно находиться ниже линии, определяющей границу достижимой глубины обработки.

5. В соответствии с выражением (1) по установленным значениям S и Δ_T, вычисляется необходимое значение технологического напряжения.

Выводы

На основании теоретических расчетов определены границы режимных параметров электрохимической прошивки отверстия в меди в 20% NaNO3 полым катодом - инструментом с соотношением наружнего и внутреннего диаметров 0,28/0,18 при различных толщинах электроизоляционного слоя.

В области режимных параметров рассчитано положение границ предельно достижимых глубин электрохимической прошивки отверстий для определенных условий обработки. Установлено, что увеличение достижимой глубины происходит с уменьшением значений подачи и технологического напряжения.

Показано, что технологические ограничения в обработке, связанные с потерей давления электролита на местных сопротивлениях гидравлического тракта, существенно сужают область режимных параметров электрохимической обработки. Установлено, что данные ограничения в основном связаны с толщиной электроизоляционного слоя на боковой поверхности катода – инструмента.

Предложен алгоритм назначения режимных параметров электрохимической прошивки с учетом технических требований чертежа к обрабатываемому отверстию.

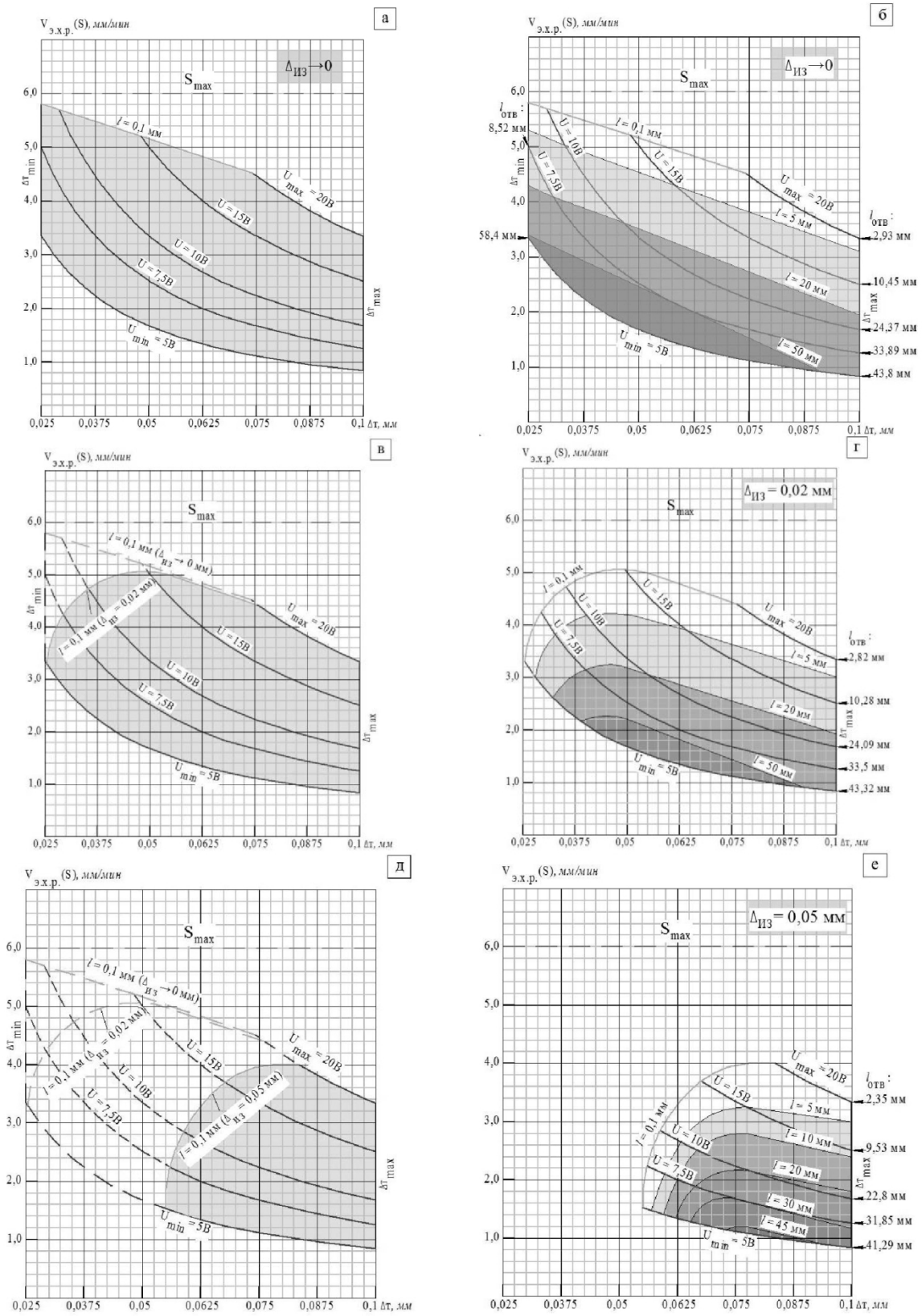

Рис. 5. Расчет границ области режимных параметров электрохимической прошивки отверстия (а, в, д) в меди М1 в 20 % $NaNO_3$ полым катодом – инструментом с соотношением диаметров 0,28/0,18 мм и границ предельно достижимых глубин обработки (б, г, е): а, б - $\Delta_{ИЗ}$ = 0 мм; в, г - $\Delta_{ИЗ}$ = 0,02 мм; д, е - $\Delta_{ИЗ}$ = 0,05 мм

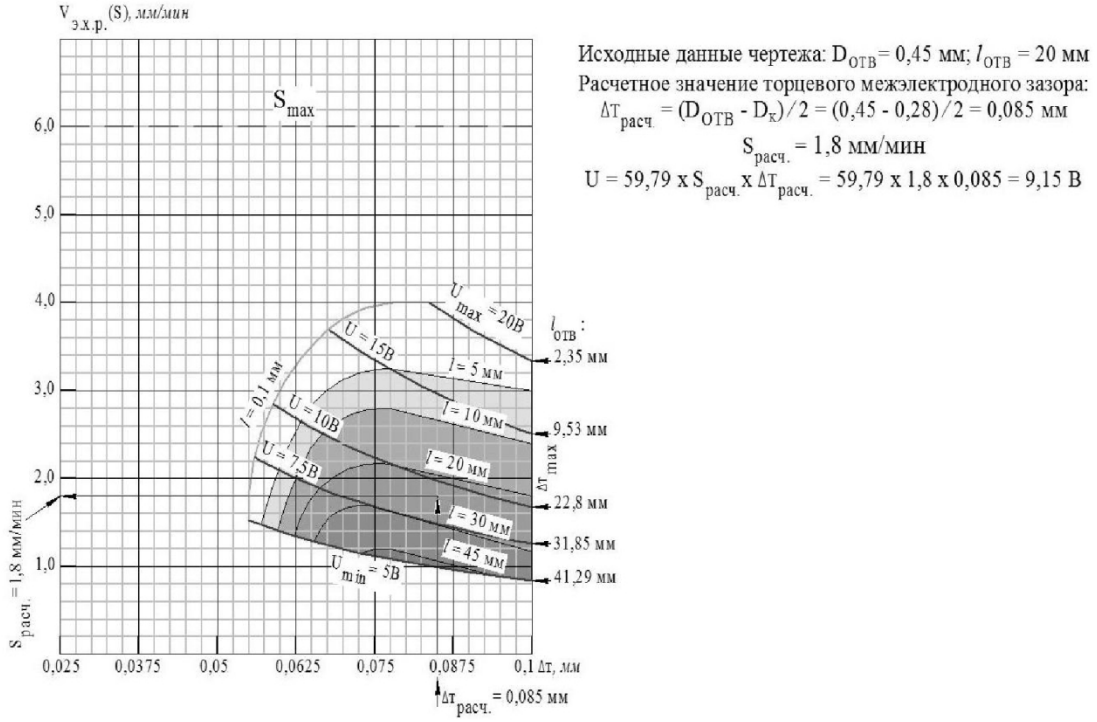

Рис. 6. Алгоритм назначения режимов электрохимической прошивки отверстия Ø 0,45 мм длиной 20 мм в меди М1 в 20 % $NaNO_3$ полым катодом – инструментом с соотношением диаметров 0,28/0,18 мм при $\Delta_{ИЗ}$ = 0,05 мм

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Веневцева С.Н., Белоусов И.А. Микроэлектрохимическая обработка материалов с применением наносекундных импульсов технологического напряжения // Современная электротехнология в промышленности России (молодежные инновации) // Сборник трудов научно – технической конференции. Тула, 7 октября 2011 г. – Тула: ТулГУ, 2011. С. 9 – 10.

2. Баранова С.Н. Микроэлектрохимическая обработка при сверхмалых зазорах // Современная электротехнология в промышленности России (молодежные инновации) // Сборник трудов научно – технической конференции. Тула, 12 октября 2010 г. – Тула: ТулГУ, 2010. – 65 с.

3. Skoczypiec S., Ruszaj A., Lipiec P. Research on ECD Localization in Case of Micro Machining with Ultra Short Pulses / Proceeding of the 16th International Symposium on Electromachining. Shanghai, China. 2010. – pp. 319 – 322.

4. Yong Li, Xiaoyu Ma, Gaihong Liu fnd others. Research of Micro ECM Using Micro Array Electrode / Proceeding of the International Symposium of Electro Machining (ISEM – 13). – Shanhau, 2010. – pp. 319 – 322.

5. Ma X., Li Y. Research of Micro Electrode Fabrication Based on ECM / Proceeding of the 16th International Symposium on Electromachining. Shanghai, China. 2010. –pp. 331 – 334.

6. Седыкин Ф.В. Размерная электрохимическая обработка деталей машин. – М.: Машиностроение. – 1976. – 346 с.

7. Байсупов И.А. Электрохимическая обработка металлов. – М.: Высш. школа, 1981. – 152 с.

8. Артамонов Б.А., Бишницкий А.Л., Волков Ю.С., Глазков А.В. Размерная электрическая обработка металлов. – М.: Высш. школа, 1978. – 336 с.

9. Мороз И.И. Электрохимическая размерная обработка металлов. – М.: «Машиностроение», 2009. – 279 с.

10.Рахимянов Х.М., Василевская С.И. Особенности формообразования малых отверстий в меди при

электрохимической обработке в водных хлоридных растворах // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2017. - № 2 (75). – С. 6 – 16. – doi:10.17212/1994 – 6309 – 2017 – 2 – 6 – 16.

11.Рахимянов Х.М., Василевская С.И. Выбор электролитов для электрохимической обработки отверстий малого диаметра в меди. // Наукоемкие технологии в машиностроении. 2017. - № 4(70). – С. 17 – 24.

12.Рахимянов Х.М., Василевская С.И., Рахимянов К.Х., Джавадова С.В. Роль анионного состава электролита при электрохимической прошивке отверстий малого диаметра // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2018. - № 2. – С. 107 – 112. – DOI: 10.26730/1999 – 4125 – 2018 – 2 – 107 – 112.

13.Черепанов Ю.П., Самецкий Б.И. Электрохимическая обработка в машиностроении. – М.: «Машиностроение», 1972. – 117 с.

14.Альтшуль А.Д. Гидравлические сопротивления, - 2-е изд. перераб. И доп. М., Недра, 1982. – 224 с.

REFERENCES

1. Venevtseva S.N, Belousov I.A [Mikroelektrohimicheskaya processing materials using nanosecond pulse voltage technology] Sbornik trudov nauchno – tehnicheskoj konferentsii “Sovremennaya jelektrotehnologiya v promyshlennosti Rossii (molodezhnye innovatsii)” [Proceedings of the scientific - technical conference “Modern electrotechnology industry in Russia (youth innovation)”]. Tula, 2011. – pp. 9 – 10. (In Russian).

2. Baranova S.N. [Mikrojelektrohimicheskaja obrabotka pri sverhmalyh zazorah] Sbornik trudov nauchno – tehnicheskoj konferentsii “Sovremennaya jelektrotehnologiya v promyshlennosti Rossii (molodezhnye innovatsii)” [Proceedings of the scientific - technical conference “Modern electrotechnology industry in Russia (youth innovation)”]. Tula, 2010. 65 p. (In Russian).

3. Skoczypiec S., Ruszaj A., Lipiec P. Research on ECD Localization in Case of Micro Machining with Ultra Short Pulses / Proceeding of the 16th International Symposium on Electromachining. Shanghai, China. 2010. – pp. 319 – 322.

4. Yong Li, Xiaoyu Ma, Gaihong Liu fnd others. Research of Micro ECM Using Micro Array Electrode / Proceeding of the International Symposium of Electro Machining (ISEM – 13). – Shanhau, 2010. – pp. 319 – 322.

5. Ma X., Li Y. Research of Micro Electrode Fabrication Based on ECM / Proceeding of the 16th International Symposium on Electromachining. Shanghai, China. 2010. – pp. 331 – 334.

6. Sedykin F.V. Razmernaja jelektrohimicheskaja obrabotka detalej mashin [Dimensional electrochemical processing machine parts]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1976. 346 p.

7. Baisupov I.A. Jelektrohimicheskaja obrabotka metallov [Electrochemical machning of]. Moscow, Vyssh. Shkola Publ., 1981. 152 p.

8. Artamonov BA, Bishnitsky AL, Volkov Yu.S., Glazkov A.V. Razmernaja jelektricheskaja obrabotka metallov [Dimensional electrical processing of metals]. Moscow, Vyssh. Shkola Publ., 1978. 336 p.

9. Moroz I.I. Elektrokhimicheskaya razmernaya obrabotka metallov [Electrochemical machining of metals], Moscow, Mashinostroenie Publ., 2009. 279 p.

10.Rakhimyanov Kh.M., Vasilevskaya S.I. Osobennosti formoobrazovanija malyh otverstij v medi pri jelektrohimicheskoj obrabotke v vodnyh hloridnyh rastvorah [Features of small holes formationn in copper by electrochemical machining in water chloride solutions]. Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) – Metal Working and Material Science, 2017, no. 2 (75), pp. 6 – 16. Doi: 10.17212/1994 – 6309 – 2017 – 2- 6 – 16.

11.Rakhimyanov Kh.M., Vasilevskaya S.I., Vybor jelektrolitov dlja jelektrohimicheskoj obrabotki otverstij malogo diametra v medi [The choice of electrolytes for electrochemical machining of small diameter holes in copper], Naukoemkie tehnologii v mashinostroenii – Science intensive technologies in mechanical engineering, 2017, no. 4 (70), pp. 17–24.

12.Rakhimyanov Kh.M., Vasilevskaya S.I., Rakhimyanov K.Kh., Dzhavadova S.V. Rol' anionnogo sostava ehlektrolita pri ehlektrohimicheskoj proshivke otverstij malogo diametra [The role of anionic composition of

ekectrolyte in the electrochemical machining of small diameter holes]. Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Bulletin of the Kuzbass state technical university, 2018, no. 2, pp. 107 – 112. Doi: 10.26.730/1999 – 4125 – 2018 – 2 – 107 – 112.

13.Cherepanov Yu.P., Sametsky B.I. Jelektrohimicheskaja obrabotka v mashinostroenii [Electrochemical machining in mechanical engineering]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1972. 117 p.

14.Altschul, A.D. Gidravlicheskie soprotivleniya [Hydraulic resistance], Moscow, Mashinostroenie Publ., 1982. 224 p.

Поступило в редакцию 19.10.2018
Received 19 October 2018