

В. Э. ГАЛИЕВ, Г. И. ФАРВАЗОВА

ОСОБЕННОСТИ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В МЕЖЭЛЕКТРОДНОМ ЗАЗОРЕ ПРИ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ С ИМПУЛЬСНЫМ ТОКОМ И ВИБРАЦИЕЙ ЭЛЕКТРОДОВ-ИНСТРУМЕНТОВ

Теоретически изучены гидродинамические процессы в межэлектродном зазоре (МЭЗ) при импульсной электрохимической обработке (ЭХО) с вибрацией электрода-инструмента (ЭИ) на малых зазорах. Рассмотрены две схемы обработки: круглым ЭИ с центральной прокачкой электролита и прямоугольным ЭИ (близко к форме лопатки газотурбинного двигателя (ГТД)), с боковой прокачкой электролита. На примере лопаток изделий 117 и ВК-2500 продемонстрированы современное состояние и перспективы развития технологии импульсной ЭХО с вибрацией ЭИ. *Электрохимическая обработка; импульсный ток; вибрация электродов-инструментов; двусторонняя обработка; межэлектродный зазор*

Применение ЭХО позволило решить многие конструкторские и технологические задачи в авиастроении и других отраслях машиностроения. В настоящее время области применения размерной ЭХО имеют тенденцию к сужению по ряду причин, в том числе и в связи с проблемой повышения точности и качества поверхности обрабатываемых деталей на фоне ужесточения требований по точности и качеству поверхности и развития альтернативных методов обработки (обработка резанием, электроэрозионная обработка, точное литье и штамповка, порошковая металлургия и др.).

Одним из наиболее перспективных направлений повышения точности формообразования и качества обрабатываемой поверхности с площадью до 75...100 см² является ЭХО с вибрацией ЭИ и синхронизированной подачей рабочих импульсов тока (рис. 1) [16, 17]. Способы ЭХО с вибрацией ЭИ были изобретены советскими специалистами в 60–70-е годы [1]. Имеются работы, в которых приведено описание процессов электрохимического формообразования с вибрацией ЭИ [2–5]. Рядом отечественных и зарубежных предприятий произведены станки, реализующие различные схемы ЭХО с вибрацией ЭИ [6–13].

Вместе с тем представляют интерес задачи изучения гидродинамических процессов в МЭЗ и определение на этой основе требований к элементам электрохимических станков и технологической оснастки и оптимального соотношения технологических параметров ЭХО для обеспечения необходимых требований по точности и качеству обрабатываемых поверхностей (рис. 2).

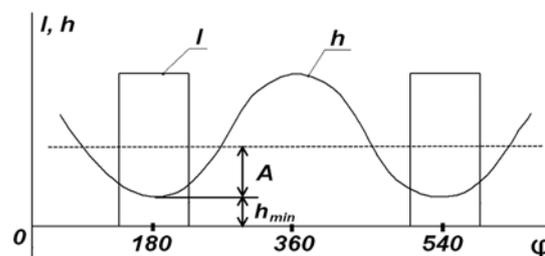


Рис. 1. Схема траектории движения ЭИ и подачи импульсного тока: I – ток; h – траектория ЭИ, определяемая величиной МЭЗ; A – амплитуда колебаний ЭИ; h_{\min} – минимальный МЭЗ; φ – фазовое положение ЭИ

При проектировании технологического процесса (ТП) и оборудования необходима оценка возможности обеспечения требуемого качества деталей при выбранных технологических параметрах и сопоставление возникающих гидродинамических усилий с податливостью станка.



Рис. 2. Технологическая оснастка для обработки лопаток КВД изделия ВК-2500

Поэтому была поставлена задача – изучение гидродинамических процессов в МЭЗ, возникающих при вибрации ЭИ на малых зазорах с целью оптимизации параметров прецизионных электрохимических станков и процесса обработки.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассмотрим две схемы обработки заготовки: круглым ЭИ с центральной прокаткой электролита (рис. 3) и прямоугольным ЭИ (близко к форме лопатки ГТД) с боковой прокаткой (рис. 4). Пластины вибрируют вдоль оси z . Жидкость поступает в зазор под давлением P_0 , а давление на выходе из зазора – $P_{\text{вых}}$. Зазор h значительно меньше размеров R_0 и R_M в случае круглого ЭИ и размеров L и B в случае прямоугольного ЭИ.

2. ОСНОВНЫЕ ДОПУЩЕНИЯ

Для представления задачи в математическом виде произведено упрощение реальных условий протекания электролита в МЭЗ. В данной работе в основу положены уравнения Навье–Стокса и неразрывности со следующими допущениями [14]:

- 1) электролит является ньютоновской жидкостью;
- 2) вязкость электролита постоянна;
- 3) электролит несжимаем;
- 4) толщина слоя электролита мала по сравнению с другими размерами;
- 5) скольжение на границе электролит – твердое тело отсутствует;
- 6) влиянием поверхностного натяжения можно пренебречь.

3. КРУГЛЫЙ ЭЛЕКТРОД-ИНСТРУМЕНТ

Средняя скорость движения электролита:

$$\bar{u} = -\frac{1}{2\mu} \cdot \frac{\partial P}{\partial r} \cdot \frac{1}{h} \int_0^h z(z-h) dz = -\frac{h^2}{12\mu} \cdot \frac{\partial P}{\partial r}, \quad (1)$$

где μ – динамический коэффициент вязкости электролита; $h = A \cdot (1 + \cos(\omega \cdot t)) + h_{\text{min}}$ – траектория движения ЭИ (рис. 1); $\frac{dh}{dt}$ – скорость движения ЭИ.

За время dt объем зазора изменится на величину:

$$\Delta U = \pi(r^2 - R_0^2) dh. \quad (2)$$

Объем электролита под электродом изменяется на величину разности объемов втекающего и вытекающего электролита:

$$\Delta U = 2\pi \cdot h \cdot (R_0 \cdot \bar{u}(R_0) - r \cdot \bar{u}(r)) dt. \quad (3)$$

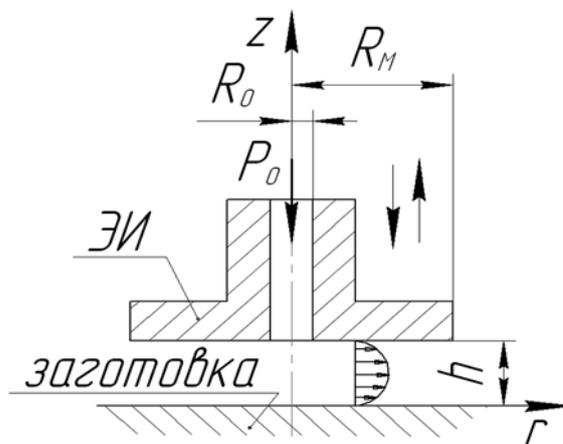


Рис. 3. Схема процесса ЭХО для круглого ЭИ с центральной прокаткой электролита

Из (2) и (3) после преобразований получаем:

$$P = \frac{6\mu}{h^3} \cdot \frac{dh}{dt} \cdot \frac{r^2}{2} + \left(R_0 \cdot \frac{\partial P}{\partial r} - \frac{6\mu}{h^3} \cdot \frac{dh}{dt} \cdot R_0^2 \right) \cdot \ln r + c,$$

используя условия на входе ($r = R_0$, $P = P_0$) и выходе МЭЗ ($r = R_M$, $P_{\text{вых}} = 0$), в итоге имеем:

$$P = \frac{3\mu}{h^3} \cdot \frac{dh}{dt} \cdot (r^2 - R_M^2) + \frac{P_0 - \frac{3\mu}{h^3} \cdot \frac{dh}{dt} \cdot (R_0^2 - R_M^2)}{\ln \frac{R_0}{R_M}}.$$

Продифференцировав данное уравнение и подставив полученное в уравнение (1), получим формулу для расчета скорости потока электролита:

$$V = -\frac{h^2}{12\mu} \cdot \frac{P_0}{r \cdot \ln \frac{R_0}{R_M}} + \frac{1}{4h} \cdot \frac{dh}{dt} \cdot \frac{1}{r \cdot \ln \frac{R_0}{R_M}} \times \\ \times (R_0^2 - R_M^2) - \frac{r}{2h} \cdot \frac{dh}{dt}. \quad (4)$$

Расход электролита в текущий момент времени:

$$Q = 2\pi \cdot r \cdot h(t) \cdot V, \quad (5)$$

с учетом формулы (4) уравнение (5) приобретает следующий вид:

$$Q = -\pi \cdot r^2 \cdot \frac{dh}{dt} - \frac{\pi}{6} \cdot \frac{h^3}{\mu} \cdot \frac{P_0}{\ln \frac{R_0}{R_M}} + \frac{\pi}{2} \cdot \frac{dh}{dt} \times \\ \times (R_0^2 - R_M^2) \cdot \frac{1}{\ln \frac{R_0}{R_M}}.$$

Сила, противодействующая движению электрода, должна быть равна интегралу давления по поверхности круглого ЭИ:

$$F = P_0 \cdot C + \frac{dh}{dt} \cdot \frac{\mu}{h^3} \cdot D,$$

где $C = \frac{k}{\ln \frac{R_0}{R_M}}$;

$$D = -\frac{3}{2} \pi \cdot (R_0^2 - R_M^2)^2 - 3 \cdot \frac{(R_0^2 - R_M^2)}{\ln \frac{R_0}{R_M}} \cdot k;$$

$$k = \left[\frac{(R_0^2 - R_M^2)}{2} - R_0^2 \cdot \ln \frac{R_0}{R_M} \right] \cdot \pi.$$

4. ПРЯМОУГОЛЬНЫЙ ЭЛЕКТРОД-ИНСТРУМЕНТ

Выдавливаемый объем жидкости:

$$\Delta U = L \cdot dh \cdot (r - r_0); \quad (6)$$

объем жидкости, которая втекает и вытекает:

$$\Delta U = (\bar{u}_0 - \bar{u}_r) \cdot L \cdot h \cdot dt. \quad (7)$$

С учетом формул (1), (6), (7) получим следующее соотношение:

$$\frac{dP}{dr} - \frac{dP}{dr_0} = \frac{12 \cdot \mu}{h^2} \cdot (r - r_0) \cdot \frac{1}{h} \cdot \frac{dh}{dt}. \quad (8)$$

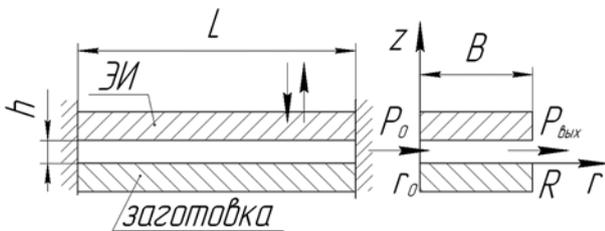


Рис. 4. Схема процесса ЭХО для прямоугольного ЭИ с боковой прокачкой электролита

Решая выражение (8), используя условия на входе ($r = r_0, P = P_0$) и выходе МЭЗ ($r = R, P_{\text{вых}} = 0$) и интегрируя полученную систему уравнений, в итоге будем иметь следующее:

$$P = P_0 \cdot \frac{R - r}{R - r_0} + \frac{6 \cdot \mu}{h^3} \cdot \frac{dh}{dt} \times (r^2 - r \cdot (r_0 + R) + r_0 \cdot R). \quad (9)$$

Продифференцировав данное уравнение и подставив полученное в уравнение (1), получим формулу для расчета скорости потока электролита:

$$V = \frac{h^2}{12\mu} \cdot \frac{P_0}{R - r_0} - \frac{1}{4h} \cdot \frac{dh}{dt} \cdot (2 \cdot r - R - r_0). \quad (10)$$

Расход электролита в текущий момент времени:

$$Q = (r - r_0) \cdot h(t) \cdot V$$

с учетом формулы (10) приобретает следующий вид:

$$Q = -\frac{h^3}{12\mu} \cdot \frac{R - r}{R - r_0} \cdot P_0 - \frac{dh}{dt} \cdot (r^2 - r \cdot (r_0 + R) + r_0 \cdot R).$$

В результате последовательного интегрирования уравнения (9) по dr и dL получена расчетная формула гидродинамического усилия для прямоугольной пластины:

$$F = \frac{P_0 \cdot B \cdot L}{2} - \frac{\mu}{h^3} \cdot \frac{dh}{dt} \cdot B^3 \cdot L.$$

Для более точного описания процессов, протекающих в МЭЗ, необходим учет податливости элементов технологической системы и масс подвижных частей при определении усилий на ЭИ и заготовку и величину МЭЗ в каждый момент времени.

5. ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЕ УРАВНЕНИЕ ВЫНУЖДЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ СИСТЕМЫ С ОДНОЙ СТЕПЕНЬЮ СВОБОДЫ

Относительное положение ЭИ определяется координатой y (рис. 5).

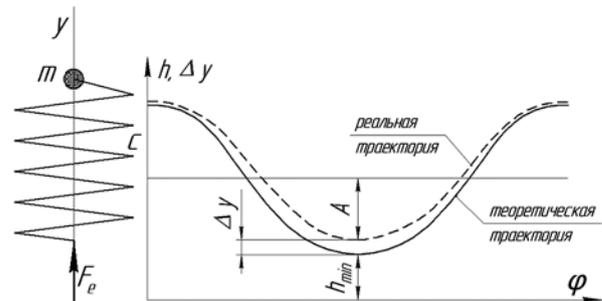


Рис. 5. Относительные колебания движущегося ЭИ

Дифференциальное уравнение колебаний ЭИ имеет вид [15]:

$$\ddot{y} + 2 \cdot n \cdot \dot{y} + k^2 \cdot y = \frac{1}{m} \cdot \left(\sum_i F_i \right), \quad (11)$$

где n – коэффициент затухания ($n < k$);

$k = \sqrt{\frac{c}{m}}$ – частота собственных колебаний системы; c – коэффициент жесткости станка; m – масса вибрирующих элементов; $\sum_i F_i$ – сумма

внешних сил.

На массу m действует переносная сила инерции и гидродинамическая сила, значение которой получено при решении уравнений Стокса–Навье:

$$\sum_i F_i = F - F_e, \quad (12)$$

где F_e – переносная сила инерции; F – гидродинамическая сила; умножив обе части уравнения (10) на m и введя обозначение $b = 2 \cdot n \cdot m$, получим следующее:

$$m \cdot \ddot{y} + b \cdot \dot{y} + c \cdot y = F - m \cdot A \cdot \omega^2 \cdot \sin(\omega \cdot t)$$

где b – эквивалентный коэффициент вязкости.

В результате изменения гидродинамических усилий при колебании ЭИ возникает упругая сила элементов станка, поэтому уравнение (12) приобретает следующий вид:

$$c \cdot \Delta y = F - m \cdot A \cdot \omega^2 \cdot \sin(\omega \cdot t),$$

где $(c \cdot \Delta y)$ – сила упругости элементов станка; Δy – деформация.

6. ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА В МЭЗ

На основе полученных зависимостей была разработана программа в среде *Delphi* с учетом технологических, геометрических параметров и характеристик электролита. Программа позволяет рассчитать давление, скорость и расход электролита, а также усилия, приходящиеся на ЭИ и заготовку.

6.1. Круглый ЭИ

На рис. 6, 7 показаны зависимости, полученные для схемы обработки плоским круглым ЭИ, со следующими входными параметрами: $\rho = 1130 \text{ кг/м}^3$ (плотность электролита); $\mu = 0,0017 \text{ кг/(м}\cdot\text{с)}$; $A = 0,2 \text{ мм}$; $h_{\min} = 30 \text{ мкм}$ (рис. 6); $P_0 = 0,2 \text{ МПа}$; $R_0 = 5 \text{ мм}$; $R_M = 40 \text{ мм}$; $f = 30 \text{ Гц}$; $c = 70 \text{ Н/мкм}$ и $m = 25 \text{ кг}$ (рис. 6, в; рис. 7).

По мере приближения ЭИ к заготовке скорость течения электролита падает и выравнивается по линии тока. При приближении к зоне нижнего положения возникает возвратное течение (выдавливание). Под ЭИ возникает центр давления (окружность, где скорость $V = 0$), в котором давление текущее больше входного $P > P_0$. Низкие значения скорости в момент максимального приближения ЭИ к заготовке и приложения импульса тока указывают на то, что поток должен быть ламинарным (число Рейнольдса Re приблизительно составило < 10).

При приближении ЭИ к нижнему положению ($\varphi = 160 \dots 180^\circ$) возрастает давление электролита, а вместе с тем усилие на ЭИ и заготовку. С уменьшением МЭЗ давление, а значит, и гидродинамическое усилие достигают своего максимума, который наступает при некотором смещении фазового положения ЭИ (на графике 164°). С уменьшением значения h_{\min} усилие существенно возрастает (рис. 7).

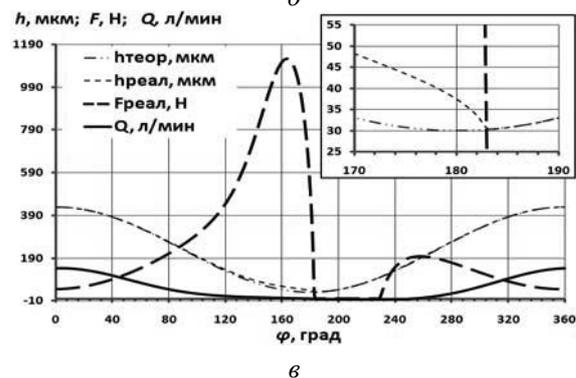
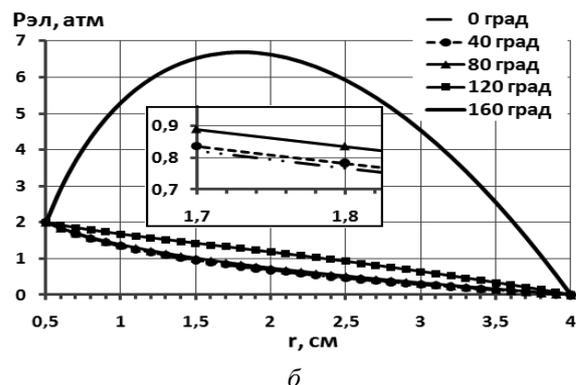
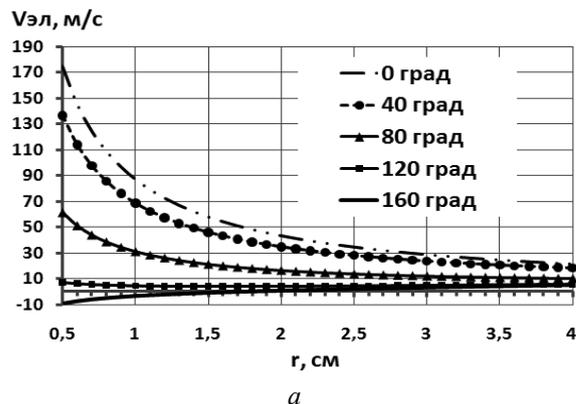


Рис. 6. Теоретические зависимости для плоского круглого ЭИ: а, б – распределения скорости и давления потока электролита в МЭЗ соответственно; в – распределения усилия и расхода электролита и траектории движения ЭИ

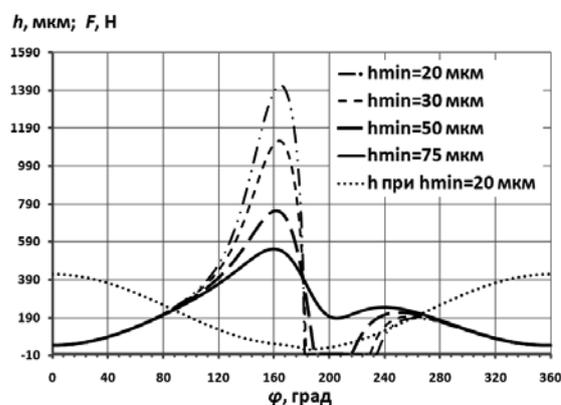


Рис. 7. Распределения усилий при различных минимальных МЭЗ и траектории движения круглого ЭИ при $h_{\min} = 20 \text{ мкм}$

6.2. Прямоугольный ЭИ

На рис. 8, 9 показаны зависимости, полученные для схемы обработки плоским прямоугольным ЭИ, со следующими входными параметрами: $\rho=1130 \text{ кг/м}^3$ (плотность электролита); $\mu=0,0017 \text{ кг/(м}\cdot\text{с)}$; $A=0,2 \text{ мм}$; $h_{\min}=30 \text{ мкм}$; $P_0=0,2 \text{ МПа}$; $B=35 \text{ мм}$; $L=70 \text{ мм}$; $f=30 \text{ Гц}$ (рис. 8); $c=70 \text{ Н/мкм}$ и $m=25 \text{ кг}$ (рис. 8, в; рис. 9).

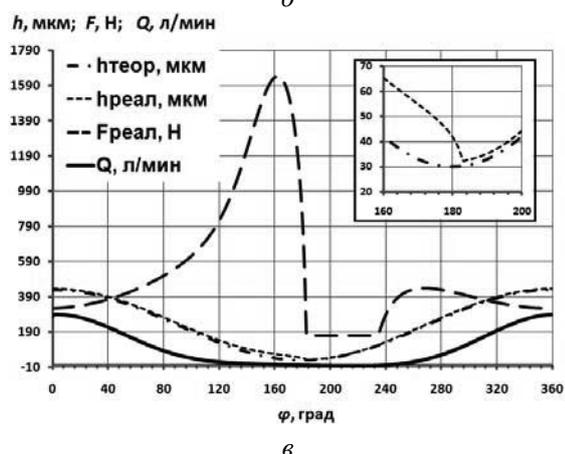
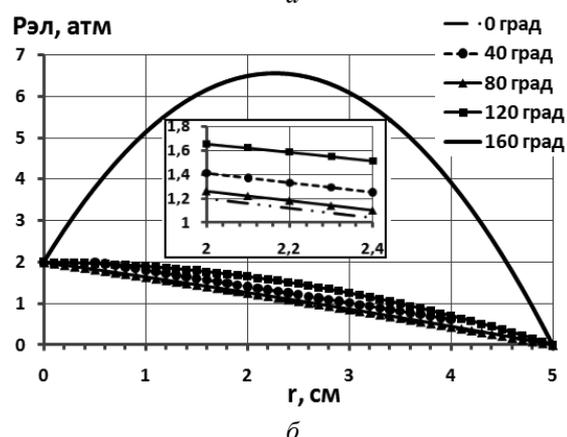
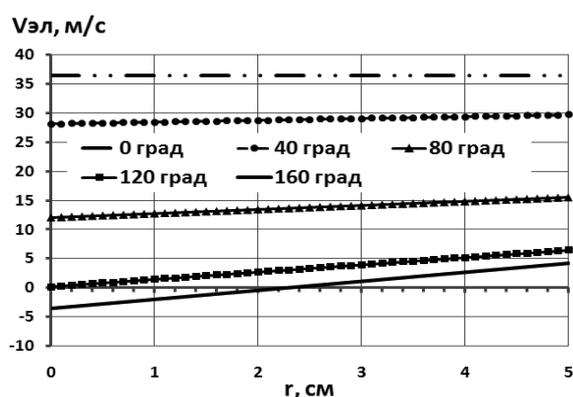


Рис. 8. Теоретические зависимости для плоского прямоугольного ЭИ: а, б – распределения скорости и давления потока электролита в МЭЗ соответственно; в – распределения усилия и расхода электролита и траектории движения ЭИ

В фазе отвода ЭИ имеет место реверс нагрузки, создаются условия для возникновения

кавитации и вскипания электролита. Режим кавитации начинается в точке, где $P = 0$. Величина области кавитации и время ее существования зависят от минимального МЭЗ h_{\min} и входного давления P_0 . С увеличением h_{\min} зона кавитации и время существования уменьшаются, а с понижением P_0 увеличиваются. При увеличении размеров ЭИ время кавитации также увеличивается. На больших зазорах и при больших давлениях кавитация не возникает вообще (для примера: для круглого ЭИ при $S_{ЭИ}=50 \text{ см}^2$, $h_{\min}=60 \text{ мкм}$, $P_0=0,4 \text{ МПа}$; для прямоугольного ЭИ при $S_{ЭИ}=50 \text{ см}^2$, $h_{\min}=60 \text{ мкм}$, $P_0=0,2 \text{ МПа}$).

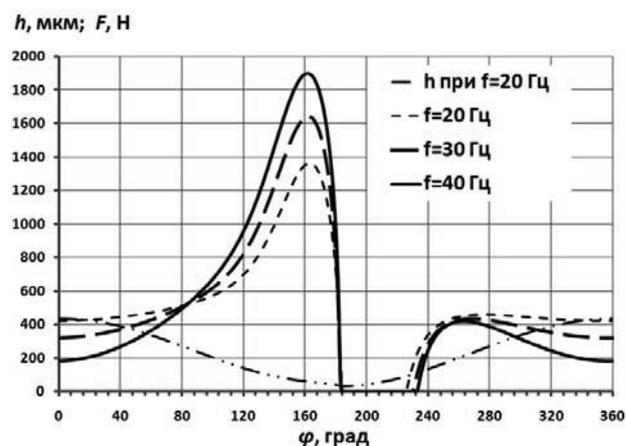


Рис. 9. Распределения усилий при различных частотах колебаний прямоугольного ЭИ и траектории движения ЭИ при $f=20 \text{ Гц}$

7. ПРИМЕНЕНИЕ

Из вышерассмотренных результатов моделирования (рис. 7 и 9) следует, что усилия могут быть настолько значительными, что вызывают большие деформации элементов технологической системы, которые нельзя не учитывать при проектировании оборудования и ТП.

Разработанные математические модели гидродинамических процессов в МЭЗ для двух схем импульсной ЭХО с вибрацией ЭИ позволяют установить взаимосвязь технологических факторов (технологический ток, частота вибрации ЭИ, амплитуда колебания ЭИ, минимальный МЭЗ, расход и давление электролита, тип электролита) с усилиями на ЭИ и заготовку, с упругой деформацией элементов технологической системы станка.

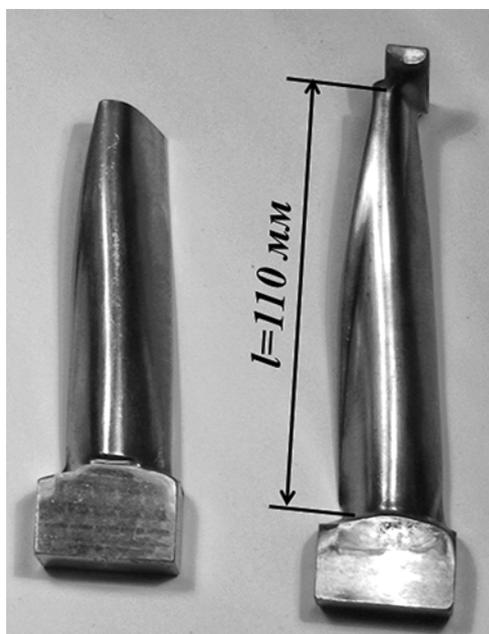
Данные разработки использовались при проектировании электрохимических станков для двусторонней обработки однополочных и двухполочных лопаток компрессора и турбины (рис. 10) в рамках работ, проводимых ОАО «Инновационный научно-технический центр «Искра».



Рис. 9. Электрохимический станок с вибрирующими ЭИ и импульсным током для двусторонней обработки лопаток – «Искра»



Рабочие лопатки 5-й ступени КВД изделия 117



Рабочая лопатка ТВД изделия ВК-2500

Рис. 10. Примеры деталей, полученных методом импульсной ЭХО с вибрирующими ЭИ

ВЫВОДЫ

1) При колебательном движении ЭИ в зоне приближения к нижнему положению на зазорах 10...50 мкм в МЭЗ возникает зона повышенного давления, при одновременном резком падении

скорости электролита и выравнивании его по линии тока. Величина Re позволяет сделать вывод о ламинарности потока электролита и даже остановке течения в некоторых областях поверхности электрода (центр давления).

2) В фазе отвода ЭИ происходит интенсивное вымывание МЭЗ электролитом.

3) Расширение «зон», в которой отсутствуют вскипание электролита и высокая электропроводность, способствует созданию «идеальных» условий для реализации ЭХО.

4) При прохождении зоны нижнего положения ЭИ происходит резкое падение давления в потоке электролита, что может привести к возникновению кавитационных явлений при отводе электрода.

5) Возникающие гидродинамические усилия следует учитывать при конструировании станков, определении возможности обработки детали с заданными геометрическими размерами для конкретного вида оборудования, а также оптимизации технологических параметров обработки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Петров Ю. Н. Основы повышения точности электрохимического формообразования / Ю.Н. Петров [и др.]. Кишинев: Штиинца, 1978. 162 с.
2. Строщков В. П. Высокоточное электрохимическое формообразование сложнопрофильного инструмента и деталей машин / Строщков В.П. [и др.]. Екатеринбург: Изд. УрО РАН. 2005. 212 с.
3. Щербак Г. А. Моделирование процесса ЭХРО катодом, совершающим колебательное и вибрационное движения / Щербак Г.А. [и др.]. // Вестник Сиб. гос. аэрокосмического университета. 2005, № 6. С. 262-265.
4. Бурков В. М. Электрохимическое формообразование с вибрацией электрода-инструмента. Иваново: Изд-во ИГХТУ, 2008. 413 с.
5. Житников В. П., Зайцев А. Н. Импульсная электрохимическая размерная обработка. М.: Машиностроение, 2008. 413 с.
6. Winbro Group Technologies [Электронный ресурс]. [2011] URL: <http://www.winbrogroup.com> (дата обращения: 24.05.2011).
7. Саушкин В. А. Проектирование технологий электрохимической обработки изделий авиационной техники. М.: Машиностроение, 2009. 360 с.
8. Зайцев А. Н. Прецизионные электрохимические копировально-прошивочные станки 2000 года // Электронная обработка материалов. 2001. № 6. С. 71-79.
9. Зайцев А. Н. Прецизионные электрохимические станки // ИТО. 2008. № 5. С. 104-107.
10. PEM Technologiegesellschaft für electrochemische Bearbeitung mbH. Inform. Rev. 2006. 12 p.

11. **Di Shi-chun.** Development of HSPECM set-up and its experiments / Di Shi-chun [et al] // Trans. Non-ferrous Metals Soc. China. 2005, V.15, 3. P. 274-278.

12. **Hewidy M. S.** Modeling the performance of ECM assisted by low-frequency vibrations / Hewidy M.S. [et al] // J.Mater. Process. Technol. 2007, V. 189, № 1-3. P. 466-472.

13. **Ebeid S. J.** Towards higher accuracy for ECM hybridized with low-frequency vibration using the resons surface methodology / Ebeid S.J. [et al] // J.Mater. Process. Technol. 2004, V. 149, № 1-3. P. 432-438.

14. **Мур Д.** Основы и применения трибоники. Л.: Мир, 1978. 488 с.

15. **Яблонский А. А., Норейко С. С.** Курс теории колебаний: учеб. пособие для студентов втузов. изд. 3-е, испр. и доп. М.: Высш. шк., 1975. 248 с.

16. **Semashko A. P.** Electrochiminal working method and system for effecting same // United States Patent 423834. Publ. July, 1980.

17. **Semashko A. P.** Electrochiminal working method and system for effecting same // United States Patent 4257865. Publ. March, 1981.

ОБ АВТОРАХ

Галиев Владимир Энгелевич, канд. техн. наук, доцент каф. технологии машиностроения. Главный технолог ОАО ИНТЦ «Искра». Дипл. инж.-механик (УАИ, 1985). Канд. техн. наук (МГТУ им. Баумана, 1990). Исслед. в обл. технологии и оборудования электрофизико-химических методов обработки.

Фарвазова Гульшат Ильдусовна, аспирант той же каф. Инженер ОАО ИНТЦ «Искра». Дипл. инженер (УГАТУ, 2010). Исслед. в обл. технологии и оборудования электрохимический методов обработки.