

И.В. Яковец^{*}, В.Г. Звонкий^{*}, О.О. Редкозубова^{**}, А.И. Дикусар^{***}

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТЕПЕНИ ЛОКАЛИЗАЦИИ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ПРИ АНОДНОМ ТРАВЛЕНИИ ЧАСТИЧНО ИЗОЛИРОВАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ В КОНТРОЛИРУЕМЫХ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

**Приднестровский госуниверситет им. Т.Г. Шевченко,
ул. 25 Октября, 128, г. Тирасполь, Молдова
**Институт прикладной физики АН Молдовы,
ул. Академией, 5, г. Кишинев, MD-2028, Молдова*

Анодное травление полости при наличии изолирующих масок используется в условиях электрохимической как микро-, так и макрообработки [1–3]. Одной из основных проблем при этом является локализация травления на участках полости, свободных от изоляции. Повышение локализации достигается уменьшением подтравливания под изоляцией. Распределение скоростей анодного растворения на каждом свободном от изоляции участке определяет степень локализации и зависит от формы, размеров и расположения как изолированных, так и неизолированных участков поверхности, потенциала, плотности тока, гидродинамических условий [2–10].

Проблема уменьшения подтравливания под изоляцией не во всех случаях является определяющей. В некоторых технологиях, основанных на анодном травлении материала при наличии маски, критическим параметром служит глубина травления. Однако и эта величина непосредственно связана с локализацией, поскольку при заданном количестве пропущенного заряда Q глубина травления будет определяться достигаемым распределением скоростей травления (глубина и скорость растворения в нормальном направлении при $Q = \text{const}$ будут тем выше, чем меньше подтравливание, и наоборот).

Количественно степень локализации обычно определяется величиной фактора травления EF (отношение глубины травления h к подтравливанию под изоляцией Δ).

В [10] показано, что степень локализации зависит от гидродинамических условий и достижения анодных предельных токов, то есть определяется скоростью процессов ионного массопереноса, которая в свою очередь связана с гидродинамикой. Отсюда следует, что определение локализации процессов анодного травления при наличии изолирующих масок должно осуществляться в контролируемых гидродинамических условиях.

Опыт совместной работы лаборатории электрохимической размерной обработки металлов Института прикладной физики АНМ и лаборатории «Электрохимические производства» Приднестровского госуниверситета им. Т.Г. Шевченко показывает, что для этих целей с успехом могут быть использованы локальные электродные поверхности, расположенные на поверхности вращающегося диска. В настоящей работе описаны возможности их применения для определения степени локализации при наличии изолирующих масок на анодной поверхности. Расположение таких поверхностей на определенном удалении от оси вращения дает возможность увеличить скорость ионного массопереноса при заданной скорости вращения диска [11]; использовать в одном опыте несколько электродных поверхностей, что позволяет определять EF с большей точностью.

Работа посвящена описанию применения подобного метода определения EF с использованием дисковых электродов, расположенных эксцентрично на поверхности вращающегося диска.

Ионный массоперенос к поверхности вращающегося дискового электрода с эксцентриситетом. Если собственно дисковый электрод расположен на определенном удалении от оси вращающегося диска (рис. 1), диффузионный поток на такой электрод превышает таковой к вращающемуся дисковому электроду (ВДЭ), расположенному на оси вращения [11–13]. Согласно [12] предельный диффузионный ток на такой электрод определяется следующим образом:

$$i_{\text{эксц}}^d = 1,21 i_D^d \varepsilon^{-1/3}, \quad (1)$$

где $i_{\text{эксц}}^d$ – предельный диффузионный ток на эксцентрично вращающемся дисковом электроде, i_D^d – предельный диффузионный ток на вращающемся дисковом электроде, $\varepsilon = \frac{\sqrt{\pi} d}{2 r}$ (значения d и r см. на рис. 1). По [13],

$$i_{\text{эксц}}^d = i_D^d \left(1,027 \bar{\varepsilon}^{1/3} + 0,44 \bar{\varepsilon}^{-5/3} \right), \quad (2)$$

где $\bar{\varepsilon} = \frac{r}{d}$. Применение (2) возможно в широком интервале $\bar{\varepsilon}$. В [13] показана возможность его применения в интервале $\bar{\varepsilon} = 0,66 - 3,94$.

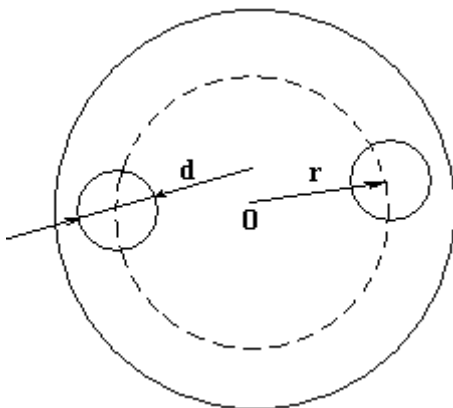


Рис. 1. Локальные электроды на поверхности вращающегося диска

Далее описаны результаты использования ВДЭ с эксцентриситетом при $r = 5$ мм и $d = 3,5$ мм ($\bar{\varepsilon} = 1,43$; $\varepsilon = 1,1$). Для этого случая расчеты по (1) и (2) практически совпадают: $i_{\text{эксц}}^d = 1,42 i_D^d$.

Локализация и скорость растворения при электрохимическом маркировании деталей из алюминиевого сплава. В [14] показаны возможности локализации анодного травления в условиях электрохимической маркировки деталей из алюминиевого сплава Д1 (основные легирующие компоненты – медь, марганец, магний) в растворе NaCl при использовании в качестве трафарета толстых самоклеющихся поливинилхлоридных масок и различных видов анодной обработки (постоянный ток, импульсный униполярный, биполярная обработка). Ниже описаны результаты оценки влияния гидродинамики на скорость и локализацию этого процесса с использованием серии вращающихся с эксцентриситетом дисковых электродов, расположенных на вращающемся диске, и самоклеющейся поливинилхлоридной маски толщиной 50 мкм. Схема использованного электродного узла представлена на рис. 2.

Анодному травлению подвергались 6 дисковых электродов диаметром $\sim 3,5$ мм, расположенных на расстоянии 5 мм от центра вращения (рис. 1). Пластина из сплава Д1 поджималась накидной гайкой к ВДЭ, высота буртика a (рис. 2) составляла 1 мм. Общее расстояние от центра вращения до буртика накидной гайки $R = 7$ мм. Таким образом, используемый ВДЭ можно рассматривать как «утопленный» ВДЭ [10, 15, 16].

Анодное травление осуществлялось в растворе NaCl концентрацией 150 г/л (2,6 М) при различных плотностях тока (0,5–8 А/см²), скоростях вращения ВДЭ (500–1500 об/мин) при постоянстве величины плотности пропущенного заряда (410 Кл/см²).

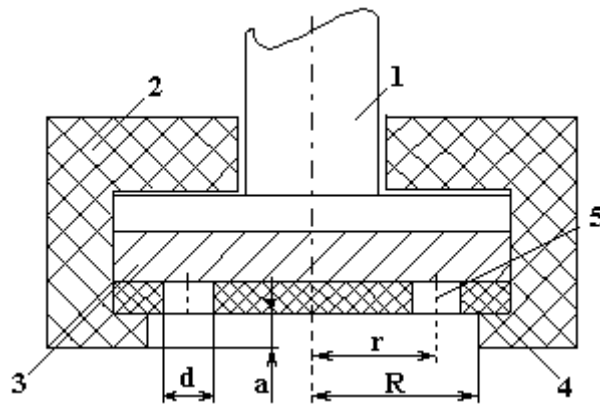


Рис. 2. Схема электродного узла: 1 – токоподвод; 2 – тефлоновая насадка; 3 – дисковый электрод из сплава Д1 или стали X18H10; 4 – поливинилхлоридная маска; 5 – отверстия активной поверхности

На рис. 3 приведена зависимость глубины травления h и подтравливания под изоляцией Δ в зависимости от средней плотности тока в расчете на начальную видимую площадь поверхности. Приведенные на рис. 3 значения представляют собой средние из измерений на 6 электродах. Максимальное среднеквадратичное отклонение составило 9 мкм для подтравливания под изоляцией и 3 мкм для глубины травления (для каждого из электродов проводились три измерения диаметра до и после травления, из которых рассчитывалось среднее значение подтравливания под изоляцией Δ , а также три измерения глубины травления h).

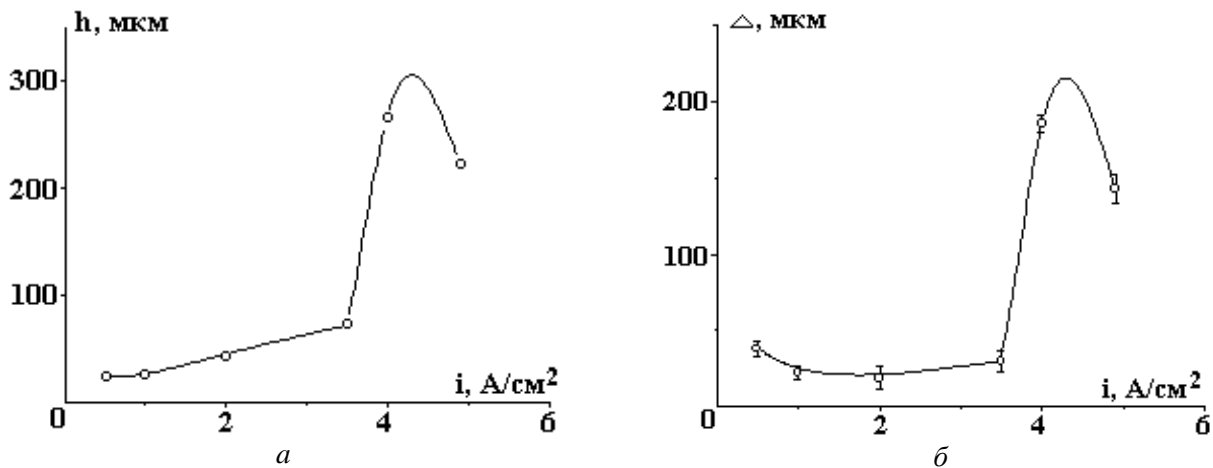


Рис. 3. Зависимость глубины травления (а) и подтравливания под изоляцией (б) от начальной средней плотности тока для $Q = 410 \text{ Кл/см}^2$, скорость вращения 500 об/мин при анодном травлении сплава Д1 в 2,6 М NaCl

Видно, что при определенной плотности тока, которую обозначим как критическую $i_{кр}$, наблюдается резкий рост как h , так и Δ . Аналогичный рост (при $Q = \text{const}$) наблюдался и при других скоростях вращения диска, однако при повышении ω (частоты вращения диска) значения $i_{кр}$ увеличивались. Зависимость $i_{кр}$ от $\omega^{1/2}$ представлена на рис. 4. Видно, что экспериментальная зависимость в координатах $i - \sqrt{\omega}$ близка к линейной. Это свидетельствует о том, что резкое изменение скорости травления связано с концентрационными ограничениями скорости реакции, а учитывая, что они наблюдаются в области высоких плотностей тока, возможно, и с термокинетическими явлениями [17]. Иными словами, наблюдаемые значения $i_{кр}$ обусловлены достижением анодных предельных токов.

Величина анодного предельного тока для используемых скоростей вращения и концентрации NaCl может быть рассчитана на основе данных [18]. Соответствующие результаты расчета для ВДЭ и дискового электрода с эксцентриситетом представлены на рис. 4. Видно, что наблюдаемые значения $i_{кр}$ лежат ниже рассчитанных значений $i_{эксц}^d$ и близки для классического ВДЭ. Соответственно наблюдаемые значения EF близки к значениям $i_{кр}$ (сравни результаты, представленные на рис. 4 и в табл. 1).

Таким образом, можно утверждать, что, так же как и в [10], максимальные значения локализации наблюдаются при таких значениях плотности тока обработки, которые близки к анодной предельной плотности тока для данного металла в используемом растворе при соответствующих гидродинамических условиях.

При этом возникает вопрос о причинах снижения $i_{кр}$ по сравнению с рассчитанными значениями $i_{эксц}^d$ (рис. 4). Вполне вероятно, что подобное снижение обусловлено используемой маской, которая существенно толще (на порядок величины) использованной в [10] фоторезистивной маски. Очевидно, в этом случае могут значительно отличаться от наблюдаемых для классического ВДЭ и реальные скорости ионного массопереноса. Другой причиной может быть то, что в данном случае поверхность растворения вследствие накопления на ней продуктов «нерастворения» (черной пленки из оксидов легирующих компонентов сплава, что, собственно, и обеспечивает возможность использования такого типа растворения для маркировки) представляет собой макроскопически неоднородную поверхность. А в этом случае из-за блокировки части поверхности общая скорость процесса снижается (см., например, [19–21]).

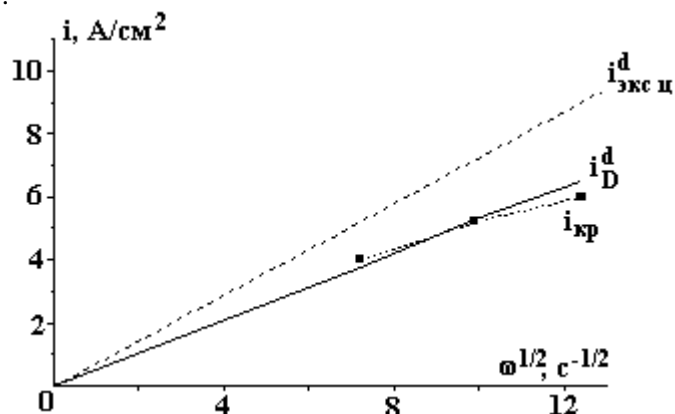


Рис. 4. Зависимость критической плотности тока резкого увеличения скорости обработки в нормальном направлении от корня квадратного из частоты вращения диска при анодном травлении сплава Д1 в 2,6 М NaCl

Таблица 1. Факторы травления в зависимости от начальной плотности тока и скорости вращения диска при анодном травлении сплава Д1 в 2,6 М NaCl ($Q = 410 \text{ Кл/см}^2$)

$n = 500 \text{ об/мин}$		$n = 1000 \text{ об/мин}$		$n = 1500 \text{ об/мин}$	
$i, \text{ А/см}^2$	EF	$i, \text{ А/см}^2$	EF	$i, \text{ А/см}^2$	EF
0,5	$0,65 \pm 0,08$	0,5	$0,37 \pm 0,03$	1	$0,90 \pm 0,08$
1	$1,54 \pm 0,18$	1	$0,82 \pm 0,09$	3	$0,70 \pm 0,05$
2	2,34	3	$1,71 \pm 0,16$	4,9	$0,85 \pm 0,07$
3,5	$4,19 \pm 0,32$	4,9	$2,31 \pm 0,28$	6	$0,85 \pm 0,06$
4	$1,45 \pm 0,05$	5,6	$1,82 \pm 0,09$	7	1,13
4,9	$1,60 \pm 0,9$	6	$1,84 \pm 0,11$	8	$0,90 \pm 0,13$
		7	$1,56 \pm 0,06$		

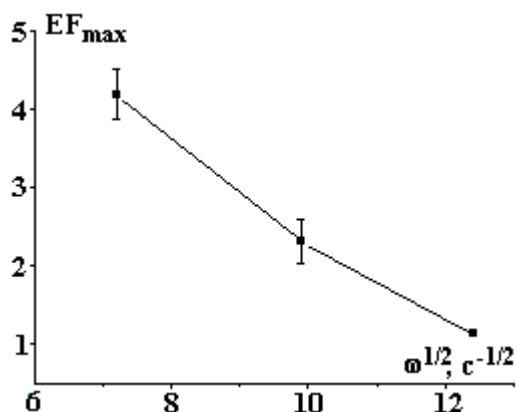


Рис. 5. Зависимость максимального значения фактора травления от частоты вращения диска при анодном травлении сплава Д1 в 2,6 М NaCl

Следует отметить также важный для технологии вывод, который может быть получен из проведенного исследования, а именно: наблюдаемые максимальные значения EF снижаются с ростом скорости перемешивания (табл. 1, рис. 5).

Локализация и скорость растворения применительно к электрохимической технологии получения сложнопрофильных отверстий малой глубины в стали. Электрохимическая технология может быть весьма эффективной при получении глухих сложнопрофильных отверстий малой глубины (~ 15–20 мкм) в деталях различного назначения. При этом достижение заданной формы и размеров обеспечивается: а) формой маски; б) величиной пропущенного заряда; в) степенью локализации травления, которая определяет соотношение скоростей растворения в нормальном направлении и подтравливания под изоляцией.

В качестве примера приводятся результаты определения глубины травления и EF при анодном травлении стали X18H10 по описанной методике (рис. 6).

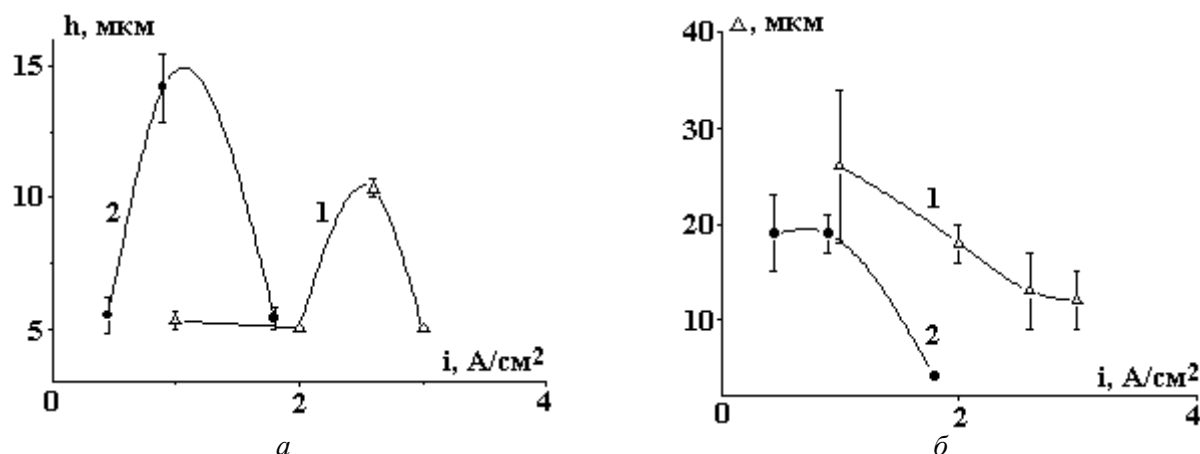


Рис. 6. Зависимость глубины травления (а) и подтравливания под изоляцией (б) от начальной средней плотности тока для $Q = 41 \text{ Кл/см}^2$, скорость вращения 1000 об/мин при анодном травлении стали X18H10 в 4 М (1) и 6 М (2) растворах NaCl

Видно, что и в этом случае при определенных значениях плотности тока (зависящих от концентрации электролита) достигается максимальная глубина травления. Максимальной глубине травления соответствует максимальное значение EF (табл. 2).

Таблица 2. Факторы травления в зависимости от начальной плотности тока при анодном травлении ВДЭ с эксцентриситетом из стали X18H10 в 4 М NaCl и $Q = 41 \text{ Кл/см}^2$

№	$i, \text{ A/см}^2$	EF
1	1	$0,30 \pm 0,12$
2	2	$0,34 \pm 0,04$
3	2,6	$1,30 \pm 0,40$
4	3	$0,57 \pm 0,17$

Сравнение значений плотности тока, при которых достигается максимальная локализация, с величинами анодных предельных токов для ВДЭ и ВДЭ с эксцентриситетом осуществлялось с той лишь разницей, что использовались экспериментальные данные [22] для растворения железа в NaCl. Это сравнение показало, что в данном случае эффекты массопереноса приводят к повышению локализации и, как следствие, к повышению глубины травления при заданном Q (рис.6). Однако согласие лишь полуколичественное. Так, например, при растворении стали в 4 М NaCl и $n = 1000$ об/мин максимум локализации достигается при 2,6 А/см² (рис. 6, табл. 2), что соответствует $i_{пр}$ для ВДЭ из Fe при использованных скорости вращения и концентрации раствора, но не для ВДЭ с эксцентриситетом, для которого, как указывалось, $i_{пр}$ должен быть на 40% выше.

Еще большее отклонение наблюдается для 6 М раствора. Если для ВДЭ из Fe $i_{пр}$ при скорости вращения и концентрации достигаются при ~ 1,8 А/см² [22], то в описываемых экспериментах максимальные значения h достигаются при 0,9 А/см² (рис. 6). Однако, как это и должно следовать из ги-

потезы об определяющем влиянии эффектов массопереноса, увеличение концентрации NaCl должно снижать $i_{пр}$, что и наблюдается (рис. б).

Полученные результаты могут послужить основой разработки технологических процессов электрохимической размерной обработки, обеспечивающих контроль параметров обработки.

Авторы выражают благодарность А.А. Зуеву и В.А. Коблову за помощь в проведении экспериментального исследования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ильин В.А. Химические и электрохимические процессы в производстве печатных плат (приложение к журналу «Гальванотехника и обработка поверхности»). Вып. 2. М., 1994.
2. Datta M., Romankiw L.T. Application of Electrochemical Micromachining in the Electronics Industry // J. Electrochem. Soc. 1989. Vol. 136. Nr. 6. P. 285C.
3. Datta M. Microfabrication of Electrochemical Metal Removal // IBM Journal of Research and Development. Vol. 42. Nr. 5. 1998.
4. West A.C., Madore Ch., Matlosz M., Landolt D. Shape Changes during Through-Mask Electrochemical Micromachining of Thin Metal Films // J. Electrochem. Soc. 1992. Vol. 139. Nr. 2. P. 499.
5. Kwon G.-J., Sun H.-Y., Sohn H.-J. Wall Profile Development in Through-Mask Electrochemical Micromachining of Invar Alloy Films // J. Electrochem. Soc. 1995. Vol. 142. Nr. 9. P. 3016.
6. Shenoy R.V., Datta M. Effects of Mask Wall Angle on Shape Evolution during Through-Mask Electrochemical Micromachining // J. Electrochem. Soc. 1996. Vol. 143. Nr. 2. P. 544.
7. Дукусар А.И., Келоглу О.Ю., Ющенко С.П. Моделирование эволюции формы полости в тонком слое металла при ЭХМО частично изолированной анодной поверхности // Электрохимия. 1999. Т. 35. № 6. С. 724.
8. Rosset E., Datta M., Landolt D. Electrochemical Dissolution of Stainless Steel in Flow Channel Cells with and without Photoresist Masks // J. Appl. Electrochem. 1990. Vol. 20. Nr. 1. P. 69.
9. West A.C., Newman J. Current Distributions on Recessed Electrodes // J. Electrochem. Soc. 1991. Vol. 138. Nr. 6. P. 1620.
10. Дукусар А.И., Редкозубова О.О., Ющенко С.П., Криксунов Л.Б., Харрис Д. Роль гидродинамических условий в распределении скоростей анодного растворения на участках травления полости при электрохимической микрообработке частично изолированной поверхности // Электрохимия. Т. 39. № 10. 2003. С. 1201.
11. Тарасевич М.Р., Хрущева Е.И., Филиновский В.Ю. Вращающийся дисковый электрод с кольцом. М., 1987.
12. Chin D.-T., Litt H.M. Mass Transfer to Point Electrodes on the Surface of a Rotating Disk // J. Electrochem. Soc. Vol. 119. Nr. 10. 1972. P. 1338.
13. Mohr C.M. jr., Newman J. Mass Transfer to an Accentric Rotating Disk Electrode // J. Electrochem. Soc. 1975. Vol. 122. Nr. 7. P. 928.
14. Володина Г.Ф., Звонкий В.Г., Зуев А.А., Магурян И.И., Редкозубова О.О., Яхова Е.А., Дукусар А.И. Локализация анодного травления толстыми полимерными масками и состав поверхностных слоев при электрохимическом маркировании деталей из алюминиевых сплавов // Электронная обработка материалов. № 2. 2005. С. 4–10.
15. Dinan T.E., Matlosz M., Landolt D. Experimental Investigation of the Current Distribution on a Recessed Disk Electrode // J. Electrochem. Soc. Vol. 138. Nr. 10. 1991. P. 2947.
16. Дукусар А.И., Редкозубова О.О., Ющенко С.П., Криксунов Л., Харрис Д. Макрораспределение скорости анодного растворения на вращающемся дисковом электроде с частично изолированной поверхностью // Электрохимия. Т. 39. № 10. 2003. С. 1269.
17. Дукусар А.И., Энгельгардт Г.Р., Молин А.Н. Термокинетические явления при высокоскоростных электродных процессах. Кишинев, 1984.
18. Нечаев А.В., Левин А.И. Анодное поведение алюминия в процессе электрохимической размерной обработки // Электрохимическая размерная обработка металлов. Кишинев, 1974.
19. Филиновский В.Ю. Предельный диффузионный ток на макроскопически неоднородный электрод // Итоги науки и техники. Электрохимия. Т. 29. М., 1989. С. 3.
20. Дукусар А.И., Ющенко С.П., Киоссе Г.А., Петренко П.А. Диффузионная кинетика анодного растворения вольфрама, содержащего пассивную фазу, в щелочи // Электронная обработка материалов. 1995. № 5–6. С. 64.

21. Дикусар А.И., Редкозубова О.О., Ющенко С.П., Яхова Е.А. Анализ влияния макроскопической неоднородности на скорость анодного растворения железа Армко в области смешанной кинетики // Электрохимия. Т. 38. № 6. 2002. С. 712.

22. Kuo H.C., Landolt D. On the Role of Mass Transfer in High Rate Dissolution of Iron and Nickel in Concentrated Chloride Media // Electrochem. Acta. Vol. 20. Nr. 5. 1975. P. 393.

Поступила 01.11.04

Summary

The method of determination of electrochemical process localization degree at anodic dissolution of partially insulated surface under controlled hydrodynamic conditions with use of local sites of an electrode surface located on a rotating disk (rotating disk electrodes with eccentricity) has been suggested. The method has been used for determination of interconnection between a degree of electrochemical process localization and etching rate in a normal direction on composition of electrolyte and hydrodynamic conditions with reference to electrochemical marking of parts from aluminium alloy D1 (alloying components – copper, magnesium, manganese) and to electrochemical fabrication of holes of complex shape and small depth (15–20 μm) in steel parts in NaCl solutions of various concentration.

Б.И. Ставицкий, И.Б. Ставицкий

ЭЛЕКТРОИСКРОВАЯ ОБРАБОТКА МАТЕРИАЛОВ В ПРИКЛАДНОМ ИСКУССТВЕ, ПРОИЗВОДСТВЕ ЮВЕЛИРНЫХ И ХУДОЖЕСТВЕННЫХ ИЗДЕЛИЙ

*Московский государственный технический университет им. Н.Э.Баумана,
ул. 2-я Бауманская, д.5, г. Москва, 105005, Россия*

С момента появления принципиально нового электрического способа обработки материалов – электроискрового способа – подчеркнута возможность его использования не только для осуществления заготовительных работ, обработки разнообразных деталей, легирования материалов, но и в прикладном искусстве. В ранних работах [1–3] Б.Р. Лазаренко и Н.И. Лазаренко обратили внимание читателей на возможность нанесения надписей и рисунков на металлы и даже стекло, покрытое тонкой электропроводной пленкой, с помощью электропера. Надписи, сделанные электропером, имеют металлический блеск, характерный для поверхностей, обработанных электроискровым способом. Они особенно эффектны на оксидированном металле. Рисунки или надписи можно осуществлять как за счет снятия с обрабатываемой поверхности порций металла (при этом обрабатываемый материал является анодом, а "перо" – катодом), так и за счет его нанесения (в этом случае, наоборот, обрабатываемый материал является катодом, а "перо" – анодом). Электроперо представляет электромагнитную вибрационную систему, питаемую от простейшего RC генератора [2, 3]. Конструктивно оно выполнено в виде авторучки и малогабаритного электрического блока – генератора. В качестве примера на рис.1 представлены образцы, сделанные в 60-х годах электропером художниками ЦНИЛ-Электром АН СССР, на пластинах вороненой стали. В качестве электрода-инструмента использовались вольфрамовые и серебряные проволочки. Росписи осуществлялись снятием отдельных частей металла искровыми электрическими разрядами и электроискровым нанесением на поверхность стали слоев серебра различной толщины.

На рис. 2 показан отпечаток сложного орнамента на стальной щечке ружья, выполненный электроискровым способом специальным латунным электродом-инструментом в ЦНИЛ-Электром АН СССР.

© Ставицкий Б.И., Ставицкий И.Б., Электронная обработка материалов, 2005, № 3, С. 10–19.

21. Дикусар А.И., Редкозубова О.О., Ющенко С.П., Яхова Е.А. Анализ влияния макроскопической неоднородности на скорость анодного растворения железа Армко в области смешанной кинетики // Электрохимия. Т. 38. № 6. 2002. С. 712.

22. Kuo H.C., Landolt D. On the Role of Mass Transfer in High Rate Dissolution of Iron and Nickel in Concentrated Chloride Media // Electrochem. Acta. Vol. 20. Nr. 5. 1975. P. 393.

Поступила 01.11.04

Summary

The method of determination of electrochemical process localization degree at anodic dissolution of partially insulated surface under controlled hydrodynamic conditions with use of local sites of an electrode surface located on a rotating disk (rotating disk electrodes with eccentricity) has been suggested. The method has been used for determination of interconnection between a degree of electrochemical process localization and etching rate in a normal direction on composition of electrolyte and hydrodynamic conditions with reference to electrochemical marking of parts from aluminium alloy D1 (alloying components – copper, magnesium, manganese) and to electrochemical fabrication of holes of complex shape and small depth (15–20 μm) in steel parts in NaCl solutions of various concentration.

Б.И. Ставицкий, И.Б. Ставицкий

ЭЛЕКТРОИСКРОВАЯ ОБРАБОТКА МАТЕРИАЛОВ В ПРИКЛАДНОМ ИСКУССТВЕ, ПРОИЗВОДСТВЕ ЮВЕЛИРНЫХ И ХУДОЖЕСТВЕННЫХ ИЗДЕЛИЙ

*Московский государственный технический университет им. Н.Э.Баумана,
ул. 2-я Бауманская, д.5, г. Москва, 105005, Россия*

С момента появления принципиально нового электрического способа обработки материалов – электроискрового способа – подчеркнута возможность его использования не только для осуществления заготовительных работ, обработки разнообразных деталей, легирования материалов, но и в прикладном искусстве. В ранних работах [1–3] Б.Р. Лазаренко и Н.И. Лазаренко обратили внимание читателей на возможность нанесения надписей и рисунков на металлы и даже стекло, покрытое тонкой электропроводной пленкой, с помощью электропера. Надписи, сделанные электропером, имеют металлический блеск, характерный для поверхностей, обработанных электроискровым способом. Они особенно эффектны на оксидированном металле. Рисунки или надписи можно осуществлять как за счет снятия с обрабатываемой поверхности порций металла (при этом обрабатываемый материал является анодом, а "перо" – катодом), так и за счет его нанесения (в этом случае, наоборот, обрабатываемый материал является катодом, а "перо" – анодом). Электроперо представляет электромагнитную вибрационную систему, питаемую от простейшего RC генератора [2, 3]. Конструктивно оно выполнено в виде авторучки и малогабаритного электрического блока – генератора. В качестве примера на рис.1 представлены образцы, сделанные в 60-х годах электропером художниками ЦНИЛ-Электром АН СССР, на пластинах вороненой стали. В качестве электрода-инструмента использовались вольфрамовые и серебряные проволочки. Росписи осуществлялись снятием отдельных частей металла искровыми электрическими разрядами и электроискровым нанесением на поверхность стали слоев серебра различной толщины.

На рис. 2 показан отпечаток сложного орнамента на стальной щечке ружья, выполненный электроискровым способом специальным латунным электродом-инструментом в ЦНИЛ-Электром АН СССР.

© Ставицкий Б.И., Ставицкий И.Б., Электронная обработка материалов, 2005, № 3, С. 10–19.



а



б



в



г

Рис. 1. Электроискровая роспись на пластинах вороненой стали



Рис. 2. Отпечаток сложного орнамента на стальной щечке ружья

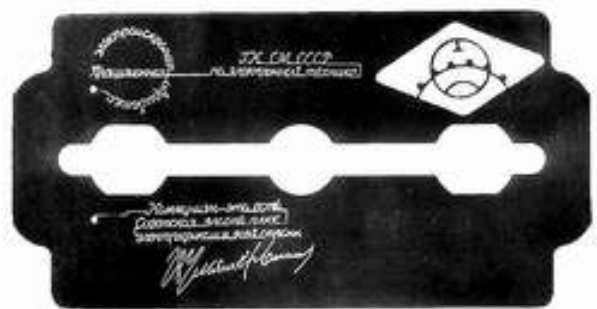


Рис. 3. Сквозные прорези сложного профиля, вырезанные в лезвии бритвы электродом-проволокой диаметром 0,04 мм



а



б



в



г



д

Рис. 4. Образцы значков (а-г) и медали (д), представляющие сквозные сложные профили, вырезанные в заготовках из нержавеющей стали толщиной 1–3 мм



а



б



в

Рис. 5. Образцы значков (а, б) и серьги (в), изготовленные электроискровым копированием

С появлением технологий изготовления прецизионных деталей электронных приборов, основанных на электроискровой вырезке электродом-проволокой и методах электроискрового последовательного копирования [4–10], методы прецизионной электроискровой обработки начали использоваться для изготовления деталей и различных сувениров, которые должны были показать как специалистам различных отраслей промышленности, так и широкой публике большие возможности электроискрового способа обработки материалов.

Например, в лезвии бритвы из закаленной стали толщиной 0,08–0,1 мм (рис. 3) вольфрамовым электродом-проволокой ВА-3 диаметром 0,03–0,04 мм вырезались пазы шириной 0,05–0,06 мм в виде различных надписей: "Прецизионная электроискровая обработка", "ГК СМ СССР по электронной технике", "Коммунизм – это есть Советская власть плюс электрификация всей страны" с автографом "В. Ульянов (Ленин)". Для завода проволоки перед вырезанием надписи в лезвии предварительно электроискровым способом прошивалось отверстие диаметром 0,05–0,1 мм. В правом углу лезвия (рис.3) методом электроискрового копирования специальным электродом-инструментом сделана сложнопрофильная сквозная полость, изображающая товарный знак оборудования, которое выпускалось в 60-х годах ОКБМ НИИ ГК СМ СССР по электронной технике (позже НПК – СТМ-6 ГНПП "Исток"). Совершенно ясно, что осуществить такие надписи или фигуры на лезвии бритвы традиционными способами невозможно.

Особой популярностью в 60–70-х годах пользовались различные сувениры, изготовленные электроискровой вырезкой или копированием. Такие сувениры выпускались, как правило, к различным юбилейным датам или мероприятиям. На рис. 4 представлены образцы значков и медали, изготовленные электроискровым способом. В пластинах полированной нержавеющей стали электродом-проволокой диаметром 0,04 мм насквозь вырезаны портреты В.И. Ленина, Ф.Э. Дзержинского, Ю.А. Гагарина и Сергея Есенина, а в колодках методом электроискрового копирования сделаны отпечатки цифр, букв и лавровых веточек. Электрод-инструмент для операции электроискрового копирования представлял медную пластину толщиной 1–3 мм с вырезанными электродом-проволокой диаметром 0,04–0,08 мм сквозными полостями в виде соответствующего рисунка – веточек, цифр и букв.

На медали (рис. 4,д) под портретом В.И. Ленина воспроизведен его автограф "В.Ульянов (Ленин)" с углублением в металл примерно на 0,1 мм и шириной элементов букв около 0,06 мм. Для этого вначале изготавливался первичный электрод-инструмент, представляющий собой прямоугольную медную пластину толщиной 1 мм, в которой электродом-проволокой диаметром 0,04 мм насквозь вырезалась соответствующая надпись. Перемещение проволочного электрода-инструмента при этом осуществлялось копированием увеличенного в 50 раз «чертежа» с соответствующим масштабированием. Ширина сложнопрофильной сквозной прорези составляла 0,06 мм. С помощью электрода методом электроискрового копирования изготавливался вторичный электрод-инструмент, на торце которого создавалась выступающая на 1–1,5 мм сложнопрофильная надпись шириной линий 0,04 мм, которая затем электроискровым способом отпечатывалась на медали.

Следует отметить, что поверхность, получаемая электроискровой обработкой, представляет совокупность перекрывающихся друг друга лунок, каждая из которых образована в результате прохождения между электродами одного электрического разряда. Поэтому поверхность, полученная в результате электроискровой обработки, не имеет зеркального блеска и является матовой. Причем параметры лунок, а следовательно, и декоративные свойства поверхности можно изменять регулировкой режимов обработки. Это свойство поверхности первоначально использовалось при изготовлении различных сувениров, а в дальнейшем – при изготовлении формообразующих поверхностей пресс-форм и чеканочных штампов. На рис. 5 представлены образцы значков и серьги, изготовленные электроискровым копированием. В пластинах полированной нержавеющей стали или других сплавов изготавливались сложнопрофильные полости глубиной 0,1–0,2 мм. Поверхность таких полостей является матовой и, следовательно, контрастной по отношению к полированной поверхности. Для увеличения контрастности изображения на полированную поверхность, до электроискрового нанесения рисунка, иногда наносили различные тонкие цветные покрытия. Например, использовали воронение поверхности, золочение, наносили нитрид титана. В этом случае полученная электроискровой обработкой полость становилась матовой, цвета материала заготовки, а остальная поверхность оставалась зеркальной, цвета нанесенного покрытия. Электрод-инструмент для копирования производился по технологии, аналогичной изготовлению электрода-инструмента для получения надписи на медали, представленной на рис. 4,д и описанной выше.

На рис. 6 показаны образцы сувениров с отпечатками на полированной поверхности кусочков литого магнитного сплава ЮНДК, который, как известно, отличается высокой хрупкостью и не поддается механической обработке. Передние поверхности и основания кристаллов, расположенные под углом 70–80° друг к другу, получены электроискровой вырезкой электродом-проволокой с последующей полировкой передних поверхностей. Глубина отпечатков составляет 0,1–0,15 мм. Отпечатки автографов, расположенные под портретами, имеют ширину линий не более 0,06 мм.

На рис. 7 представлены куски яшмы, на полированной поверхности которых сделаны аппликации элементов, вырезанных электродом-проволокой. Элементы выполнены из хромистой меди и полированной нержавеющей стали толщиной 0,5–1,0 мм.

Интересно отметить, что профиль В.И. Ленина на всех представленных рисунках идентичен, так как выполнялся по одному чертежу. Аппликация портрета В.И. Ленина на рис. 7 по сравнению с портретом на медали является негативным изображением его электрода-инструмента. Следовательно, отход электрода-инструмента может быть использован для аппликации на яшме или другом материале.

Помимо описанных сувениров с применением электроискрового метода обработки изготавливались различные украшения, например кулоны. Отличительная особенность изделий, полученных электроискровой вырезкой, от аналогичных изделий, полученных штамповкой или литьем, состоит в том, что в первом случае они имеют острые кромки по всему периметру вырезанной фигуры, что придает изделиям своеобразный, более “строгий”, вид. Образцы кулонов, изготовленных электроискровой вырезкой в заготовке толщиной 1 мм, представлены на рис. 8, других изделий, изготовленных электроискровым способом, – на рис. 9 и 10.

Несмотря на возможности, которые открывал электроискровой способ обработки, его применение в производстве ювелирных изделий ограничено. Технологии их производства по ряду причин за последние десятилетия не претерпели каких-либо существенных изменений. Изготовление ювелирных изделий традиционно является одной из самых консервативных областей производства.

Кроме этого, многие нетрадиционные технологии, разработанные для нужд оборонной, электронной и других областей промышленности, открывающие большие возможности для производства ювелирных изделий, не могут найти применения из-за незнания разработчиками потребностей ювелирного производства. В то же время ювелирным предприятиям, как правило, неизвестны многие современные достижения в области технологии обработки материалов и возможности инструментального производства.

Сдерживает применение электроискровой обработки высокая стоимость материалов ювелирных изделий. Высокая стоимость сырья и необходимость сбора всего удаляемого с заготовки материала для последующей его переработки заставляют ювелиров использовать методы обработки либо исключаящие съем материала (выдавливание, гибку, литье), либо позволяющие легко и без потерь собирать удаляемый материал (вырубка на разделительных штампах, обработка резанием). Новые технологии, основанные на электрофизических и электрохимических методах обработки материалов, как правило, затрудняющие утилизацию снимаемого материала, применяются главным образом для производства бижутерии, сочетающей использование дешевых материалов, современный дизайн и большой тираж выпускаемых изделий.

Если непосредственно для изготовления ювелирных изделий электроискровая обработка применяется недостаточно широко, то при производстве инструментов для изготовления ювелирных и художественных изделий этот способ стал, безусловно, незаменимым, а в ряде случаев и единственно возможным. Использование электроискровой обработки позволило принципиально изменить технологию изготовления многих видов инструментов – разделительных (вырубных) и чеканочных штампов, именных, клейм, накатных валков и т.д.

На рис. 11,а в качестве примера представлены матрицы чеканочных штампов для производства кулонов, а на рис. 11,б – электроды-инструменты для изготовления рабочих поверхностей этих чеканочных штампов. Электроды-инструменты изготовлены в МГТУ им. Н.Э.Баумана по технологии, основанной на применении электрофизических методов обработки материалов и полностью исключаящей традиционное гравирование, как, впрочем, и другие виды механической обработки материалов.

Широкое применение электроискрового способа в производстве ювелирных и художественных изделий стало возможным благодаря появлению систем числового программного управления (ЧПУ). Современные системы ЧПУ позволяют резко сократить трудоемкость изготовления инструментов вследствие автоматизации процесса обработки, а также снижения или полного исключения

слесарной подгонки, получать рабочие фигуры и поверхности высокой сложности, не осуществимые при слесарном исполнении. Кроме этого, они обладают многими специальными функциями, расширяющими возможности изготовления инструментальной оснастки, например масштабирование выре-



Рис. 6. Сувениры с отпечатками, выполненными комбинированным электроискровым способом на полированных поверхностях кусочков литого магнитного сплава ЮНДК



Рис. 7. Аппликации на полированных поверхностях яшмы элементов, вырезанных из хромистой меди (а) и полированной нержавеющей стали (б) толщиной 0,5–1,0 мм



Рис.8. Образцы кулонов, изготовленных электроискровой вырезкой в заготовке толщиной 1 мм

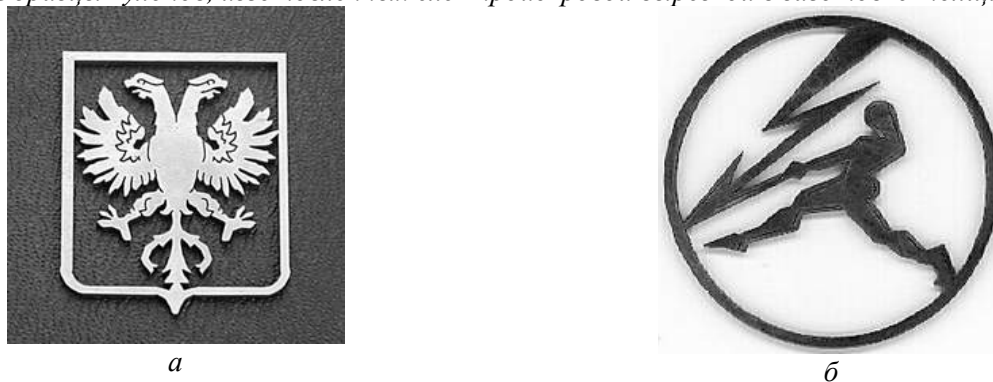


Рис. 9. Сложные профили, вырезанные электродом-проволокой в нержавеющей стали толщиной 1,0 мм



а



б

Рис. 10. Значки, выпущенные к международному симпозиуму, посвященному 50-летию электроискровой обработки материалов EDM-50 (а) и 50-летию СССР (б)



а



б

Рис. 11. Матрицы чеканочных штампов (а) и электроды-инструменты для их изготовления (б)



Рис. 12. Электрод-инструмент для изготовления формообразующих поверхностей чеканочного штампа, предназначенного для производства серег

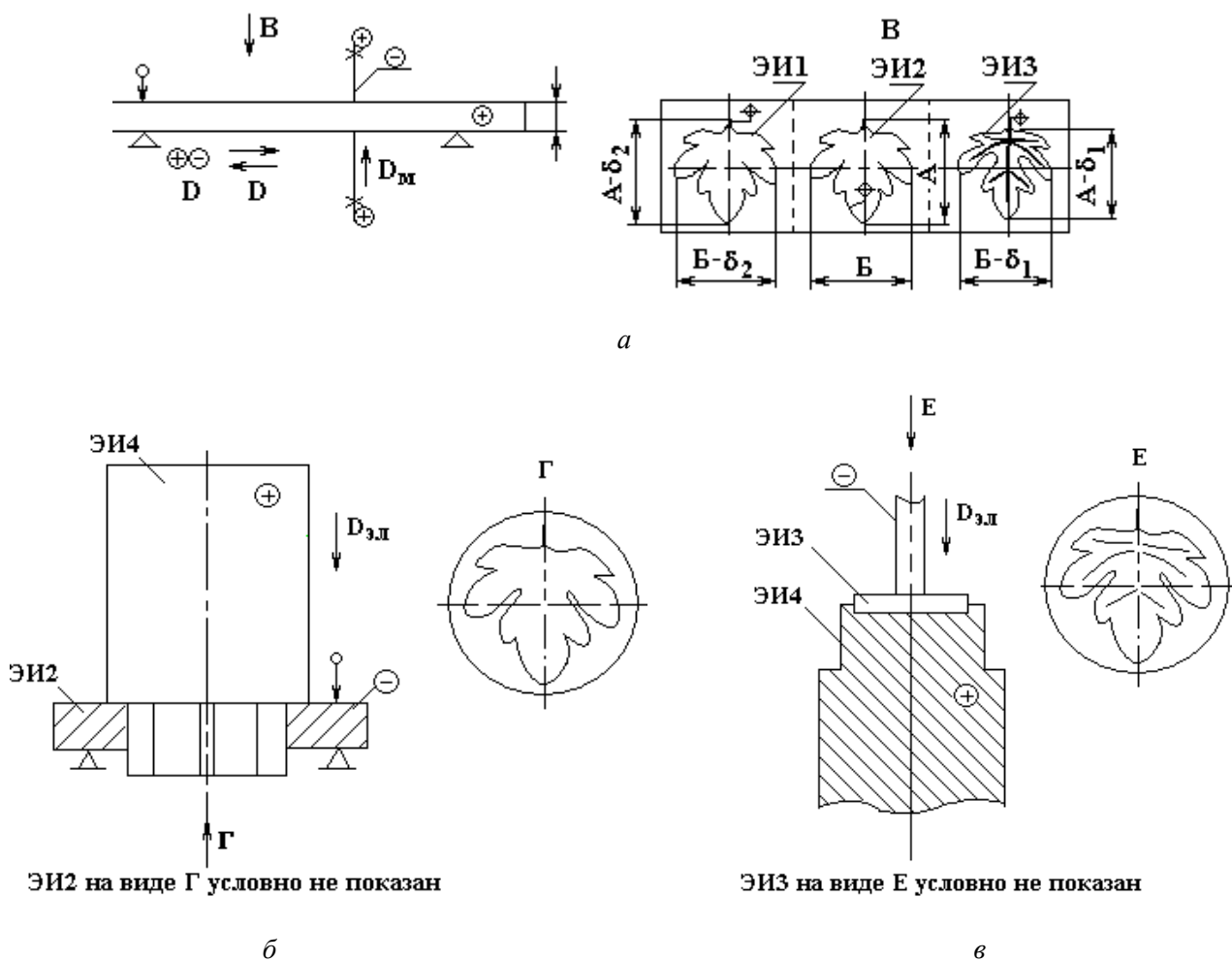
заемой рабочей фигуры, обкатка инструментом заготовки, зеркальное отображение вырезаемого контура, конусная вырезка и т.д.

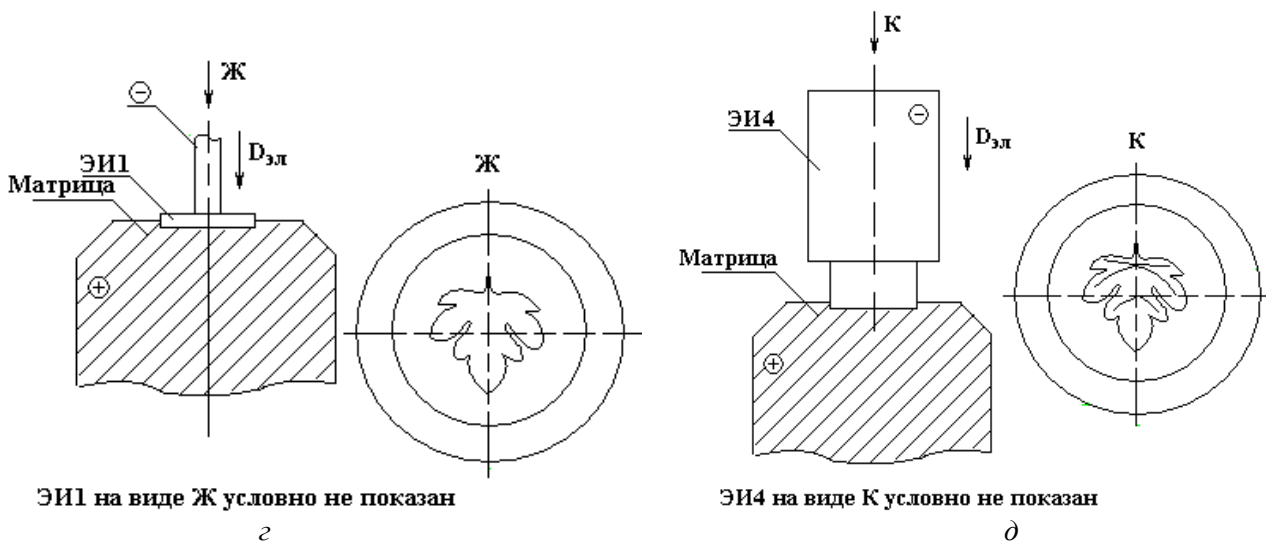
На рис.12 представлен электрод-инструмент, предназначенный для электроискрового изготовления формообразующих поверхностей чеканочного штампа производящего декоративные элементы серег. Электрод-инструмент изготовлен из меди марки М1 электроискровым способом.

В чеканочном штампе, как известно, самым сложным элементом, с точки зрения изготовления, является матрица. Наибольшую сложность при ее изготовлении представляет рабочая фигура, у которой малые размеры, сложная трехмерная геометрия и высокое качество поверхности. Одним из наиболее эффективных среди существующих методов изготовления рабочих фигур является электроискровая обработка.

Ниже приводятся технологии изготовления представленного на рис.12 электрода-инструмента и соответствующей рабочей поверхности матрицы чеканочного штампа для производства серег. Для создания рабочей фигуры в матрице изготовлено четыре вспомогательных электрода-инструмента (ЭИ).

Первоначально на электроискровом вырезном станке модели А.207.92М изготовлены три вспомогательных электрода-инструмента ЭИ1, ЭИ2 и ЭИ3 (рис. 13,а). Вырезка электродов-инструментов осуществлялась из медной пластины марки М1 толщиной 2 мм медной проволокой диаметром 0,15 мм, габариты рабочей фигуры штампа А×Б (11×10 мм). ЭИ1 представляет вырезанную из медной пластины рабочую фигуру, эквидистантно уменьшенную на величину межэлектродного промежутка d_2 , образуемого при дальнейшей электроискровой прошивке рассматриваемым электродом. ЭИ2 представляет сквозную полость с размерами А×Б, вырезанную в медной пластине; ЭИ3 – вырезанную из той же пластины рабочую фигуру, но эквидистантно уменьшенную на толщину наружного канта d_1 рабочей фигуры (виноградного листа) с прорезанными пазами (будущими прожилками листа).





ЭИ1 на виде Ж условно не показан

ЭИ4 на виде К условно не показан

Рис. 13. Технологическая схема изготовления матрицы чеканочного штампа

Далее методом электроискрового копирования с помощью ЭИ2 из медного прутка изготовлен внешний контур вспомогательного электрода-инструмента ЭИ4 (рис. 13,б). Следует отметить, что все копировально-прошивочные операции выполнены на вырезном электроискровом станке модели А.207.61, где вместо электрода-проволоки в специальном приспособлении устанавливались необходимые электроды-инструменты, причем устанавливались горизонтально. Однако эти операции могут быть выполнены и на прецизионных копировально-прошивочных станках.

Следующая операция электроискрового копирования на заготовке электрода-инструмента ЭИ4 – с помощью вырезанного ранее ЭИ3 изготовлен рельеф рабочей фигуры (рис.13,в). В результате получен вспомогательный электрод-инструмент ЭИ4, представленный на рис.12.

Далее в предварительно термообработанной заготовке матрицы из стали Х12М методом электроискрового копирования при помощи ЭИ1 выполнена рабочая полость (рис.13,г). При обработке использовались полустатические режимы, при которых на формируемой поверхности видны составляющие ее лунки. Это делалось для того, чтобы впоследствии при штамповке изделий получать этой частью рабочей фигуры явно выраженную матовую поверхность, похожую на «шагреневую кожу».

На последней операции методом электроискрового копирования при помощи ЭИ4 в матрице на сформированной предыдущей операцией поверхности получены внутренний рисунок (прожилки листа) и внешний кант рабочей поверхности (рис.13,д). При этом обработка велась на режимах, обеспечивающих минимально возможные значения параметров шероховатости поверхности. Применение названных режимов позволило полностью исключить окончательную доводку и полировку рабочей поверхности матрицы.

Описанная технология требует применения четырех вспомогательных электродов-инструментов. Так как габариты рабочих фигур в ювелирном производстве небольшие, то время на изготовление вспомогательных инструментов невелико, а применение современных систем ЧПУ и методов подготовки управляющих программ позволяет резко сократить трудоемкость перечисленных операций. Наибольшую сложность в описанной технологии вызывает взаимное позиционирование электродов-инструментов при копировально-прошивочных операциях. Для решения этой задачи и соблюдения высокой точности позиционирования применяли два микроскопа МИР-2, установленных в разных точках.

Говоря о технологии, нельзя не сказать несколько слов об оборудовании, на котором она реализуется. Прежде всего следует отметить электроискровые прецизионные станки российского производства, так как именно в СССР этот метод был открыт, всесторонне исследован и созданы первые в мире электроискровые станки [10]. При этом вырезное электроискровое оборудование создавалось в первую очередь для удовлетворения потребностей электронной промышленности при изготовлении мелких, ажурных деталей и лишь затем для других производств. Поэтому оборудование, производимое на предприятиях электронной промышленности, отличается достаточно высокой точностью, компактностью, работает с обычной водопроводной водой в качестве рабочей жидкости и хорошо удовлетворяет требования ювелирного производства. При этом цена на такие станки в настоящее время в несколько раз ниже цен на станки японского или швейцарского производства. Можно рекомендовать для использования вырезные станки моделей А.207.92М и А.207.94, выпускаемые ГНПП

«ИСТОК». К сожалению, в электронной промышленности выпускается в основном вырезное оборудование, поэтому отечественные универсальные копировально-прошивочные станки, производимые другими предприятиями, могут использоваться для ювелирного производства в меньшей степени. Однако оснащение названного вырезного оборудования дополнительными приспособлениями для закрепления и базирования электродов позволяет успешно использовать их для осуществления копировально-прошивочных операций.

Сегодня совершенно очевидно, что применение электроискровой обработки материалов и современное оборудование для реализации этого способа позволяют поднять производство ювелирных и художественных изделий, а также инструмента для их производства на качественно новый уровень.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лазаренко Б.Р. Электроэрозионный способ обработки металлов. Докт. дис. НИИ МЭП. М., 1947.
2. Лазаренко Б.Р., Лазаренко Н.И. Электроискровая обработка металлов. М., 1950.
3. Лазаренко Б.Р., Лазаренко Н.И. Электроискровая обработка токопроводящих материалов. АН СССР, М., 1958.
4. Ставицкий Б.И. Электроискровое изготовление прецизионных деталей электровакуумных приборов // Труды НИИ МРТП СССР. 1957. № 11(47). С. 67–88.
5. Ставицкий Б.И. Электроискровое изготовление прецизионных деталей электровакуумных приборов // Практика применения электроискровой обработки металлов. Сб. № 2. МДНТП им. Ф.Э. Дзержинского, 1959. С. 35–52.
6. Ставицкий Б.И., Холоднов Е.В., Гуларян К.К. Электроискровая прецизионная обработка токопроводящих материалов. ЦИТЭИН. М-60-127/4. М., 1960.
7. Ставицкий Б.И. Электроискровое формообразование наружных и внутренних поверхностей непрофилированным электродом // Технология машиностроения. ЦИНТИМАШ. 1960. № 3. С. 42–47.
8. Ставицкий Б.И. Электроискровое изготовление деталей непрофилированным обрабатывающим электродом // Обмен опытом в радиоэлектронной промышленности. 1960. № 3–4.
9. Ставицкий Б.И. Электроискровое изготовление прецизионных деталей электровакуумных приборов // Электроискровая обработка металлов. 1960. Вып. 2. АН СССР. С. 67–113. (Труды ЦНИЛ-ЭЛЕКТРОМ АН СССР).
10. Ставицкий Б.И. Основные этапы, современное состояние и перспективы развития электроискровой обработки материалов // Электронная обработка материалов. 1994. № 1. С. 7–11.

Поступила 22.12.04

Summary

The article is devoted to the application of a method of an electric spark machining of materials for manufacturing of jewelry and art articles. The technological methods for manufacturing different souvenirs and articles of applied art from the moment of an electric spark machining appearance and till now are described. The illustrations of articles manufactured by the described method are presented. An expediency of using an electric spark machining for manufacturing jewelry and art articles, especially for manufacturing of jewelry tools is underlined in the article. The technology for making of working surfaces of embossing stamps for manufacturing parts of ear-rings or pendants and technology for making appropriate electrode-instruments are described as an example. The possibility to use of serially producible universal electrospark equipment for jewelry manufacturing and the recommendations for use of electrospark machines manufactured in Russia is considered.

В.И. Носуленко, О.С. Чумаченко

ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНАЯ ОБРАБОТКА ЛИСТОВЫХ ДЕТАЛЕЙ КАК НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ И ВЫСОКОЭФФЕКТИВНАЯ АЛЬТЕРНАТИВА ТРАДИЦИОННЫМ ТЕХНОЛОГИЯМ

*Кировоградский национальный технический университет,
пр. Университетский, 8, г. Кировоград, 25006, Украина*

Процессы электроразрядной обработки (ЭРО), основанные на использовании преобразованной в тепло энергии разнообразных электрических дуговых разрядов и включающие традиционную электроэрозионную обработку (ЭЭО) нестационарными электрическими разрядами, размерную обработку стационарной электрической дугой (РОД) и плазменную резку (ПР), обеспечивают широкие технологические возможности, а по сравнению с процессами обработки резанием и давлением – ряд существенных преимуществ [1]. В этой связи при оптимальном сочетании специфических, зачастую уникальных технологических возможностей каждого из способов ЭРО представляется возможным, с одной стороны, осуществить все многообразие разделительных операций при изготовлении листовых деталей любых форм и размеров (чего, кстати, не обеспечивают традиционные способы обработки давлением и резанием), а с другой – уже сегодня в условиях единичного, мелкосерийного и средне-серийного производства способы ЭРО обеспечивают более высокую экономическую эффективность по сравнению с традиционными технологиями. Поэтому процессы ЭРО – это новые возможности и высокоэффективная альтернатива традиционным технологиям.

Листовые детали, составляющие в машиностроении около 70%, получают, используя разнообразные разделительные операции: резку, вырубку и пробивку, обычно осуществляемые штамповкой и изредка – механической обработкой. В то же время каждая из операций может высокоэффективно выполняться с применением одного из способов ЭРО. Поэтому необходимо экономически обосновать наиболее предпочтительный вариант технологического процесса изготовления таких деталей и в конечном счете – определения областей рационального применения каждого способа. Укажем известные области рационального применения процессов ЭРО.

ЭЭО позволяет эффективно обрабатывать малые, диаметром до нескольких сотых долей миллиметра, отверстия практически в любых сталях и многих труднообрабатываемых сплавах. Так, отверстие диаметром 0,04 мм может быть прошито на глубину 0,6–0,7 мм. Все шире используется групповая прошивка отверстий наборами электродов. Таким способом прошивают до 8000–10000 отверстий одновременно в деталях фильтров и теплообменников, изготавливают сита из нержавеющей стали. Например, 2000 отверстий диаметром 0,8 мм в листе из нержавеющей стали толщиной 1,5 мм прошивают за 25 мин. Прорезают и прошивают пазы и узкие щели шириной 0,05–0,5 мм в деталях основного производства, фрезерование которых или штамповка обычными способами затруднена или невозможна. Щели шириной 0,15–0,3 мм прошивают на глубину до 3–5 мм. ЭЭО можно получать гравюры с улучшенным изображением и повышенной глубиной рельефа. По сути, это уникальные технологии, неосуществимые другими способами металлообработки. Однако этим, собственно, и ограничивается область рационального применения ЭЭО листовых деталей.

Воздушно-плазменная резка (ВПР) позволяет получать средние и крупные детали сложных контуров (внешних и внутренних) из стального листового проката толщиной 5–60 мм при оптимизации раскроя и полной автоматизации процесса. Так, на ОАО «Красная звезда» (г. Кировоград) уже сейчас в условиях единичного и мелкосерийного производства ВПР получают около тысячи наиме-

нований деталей из стального листового проката.

Однако ВПР не позволяет получить детали внешнего и внутреннего фасонных контуров, прежде всего габаритами примерно до 100 мм с мелкими элементами при повышенных требованиях по качеству и точности обработки. Толстолистовые детали, полученные ВПР, имеют несколько оплавленную поверхность реза не перпендикулярную плоскости детали. Существенный недостаток – сравнительно большая (до 1 мм) зона термического влияния при обработке углеродистых сталей, что усложняет дальнейшую механическую обработку. Поэтому деталь в этом случае подлежит отжигу. При резании металла толщиной до 2 мм термические напряжения приводят к короблению деталей. Узкие щели шириной меньше толщины листа, мелкие прямоугольные и квадратные отверстия в толстолистовом металле становятся проблемой. ВПР затруднительно получить контуры размерами в плане менее 50 мм и отверстия с острыми углами.

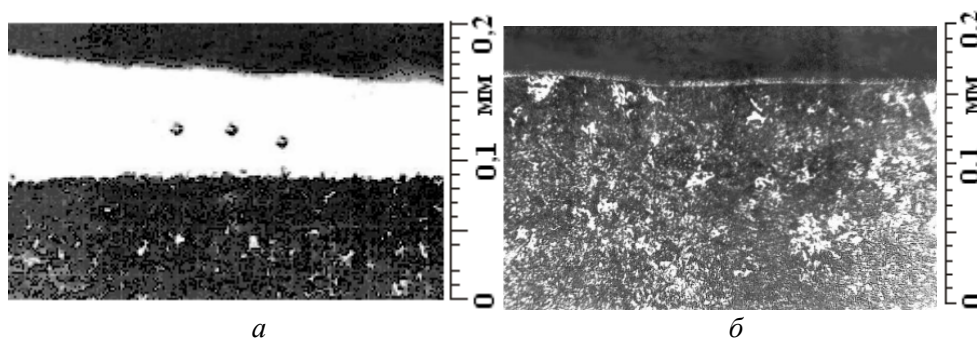


Рис. 1. Микроструктуры поверхности закаленных образцов из стали У8 после РОД

РОД широко применяется для самых разнообразных технологий [1] и, в частности, для выполнения разделительных операций при изготовлении листовых деталей [2–12 и др.], в том числе для указанных выше работ, которые нельзя осуществить ВПР, выполняя их с высокой производительностью и качеством. Прежде всего это касается получения внутренних и внешних контуров фасонных листовых деталей с габаритами в плане примерно до 100 мм при зоне термического влияния, которая является управляемой (рис. 1,а) и при необходимости может практически отсутствовать (рис. 1,б); при шероховатости обработанной поверхности в пределах R_a 6,3 и менее и при точности обработки, соответствующей обычной точности инструментальных работ, то есть в пределах сотых долей миллиметра. Необходимая точность обработки обеспечивается малым межэлектродным зазором, составляющим 0,05–0,15 мм, и точным изготовлением профилированного электрода-инструмента (ЭИ), исполнительные размеры которого для внутренних отверстий B_O и внешних контуров (стержней) B_C определяют по формулам:

чистовая обработка

$$B_O = (A + 0,7\Delta_B - 2\delta_2)^{+0,3\Delta_B}, \quad (1)$$

$$B_C = (A - 0,7\Delta_C + 2\delta_2)^{-0,3\Delta_C}, \quad (2)$$

черновая обработка

$$B_O \leq [A + 0,7\Delta_B - 2(\delta_1 + z_{\min})]^{+0,3\Delta_B}, \quad (3)$$

$$B_C \geq [A - 0,7\Delta_B + 2(\delta_1 + z_{\min})]^{-0,3\Delta_H}, \quad (4)$$

где A – номинальный размер детали; δ_1 и δ_2 – межэлектродные зазоры соответственно при черновой и чистовой обработке; z_{\min} – минимальный припуск на обработку; Δ_B и Δ_H – верхнее и нижнее отклонение поля допуска детали.

Технологические схемы формообразования РОД позволяют реализовать необходимые условия высокопроизводительной обработки – многоэлектродную прошивку, обработку пакетом (рис. 2), исполнение операций по принципу последовательного и совмещенного действия и др. Все это, а также соответствующий выбор режимов обработки позволяют достичь оптимальной производительности и качества обработки.

Таким образом, укажем, что процессы ЭРО обеспечивают не только выполнение всего многообразия разделительных операций при изготовлении листовых деталей, осуществляемых традиционными технологиями, но и новые технологические возможности. Остается лишь установить область практического применения ЭРО.

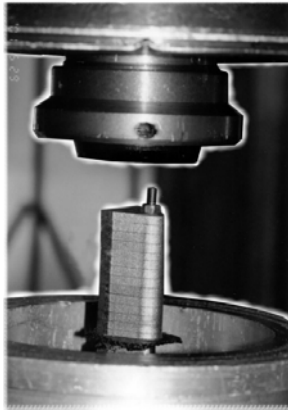


Рис. 2. Рабочая зона станка “Дуга-8” при обработке пакета деталей

Экономическая эффективность технологических процессов неразрывно связана с серийностью и конкретными условиями данного производства, а следовательно, является не только технологическим, но и организационно-технологическим понятием. Поэтому как при выборе оптимального варианта конкретного технологического процесса, так и при определении областей рационального применения каждого из указанных способов следует исходить из всего многообразия факторов, существенно влияющих на технологическую себестоимость продукции. Обобщенная формула технологической себестоимости для разделительных операций имеет вид

$$C_d = v_i + \frac{P_i}{N_B} = M_o + Z_{o.d.c.} + B_{el} + B_{сп} + B_B + B_{a.ob.} + B_{еп} + C_{el.vфр} + B_{el.гр.} + B_{p.p.} + \frac{1}{N_B} (Z_{нал} + B_{ш} + B_H + B_{a.сп.}). \quad (5)$$

Здесь v_i – переменные затраты, величина которых в годовой технологической себестоимости изменяется пропорционально изменению программы выпуска продукции N_B ; p_i – постоянные затраты, величина которых существенно не изменяется по сравнению с объемом годового выпуска продукции; M_o – стоимость основных материалов, которая учитывается, если изменяется способ раскроя или марка материала; $Z_{o.d.c.}$ – основная и дополнительная заработная плата производственных рабочих; B_{el} , $B_{сп}$, B_B , $B_{a.ob.}$, $B_{еп}$, $C_{el. вфр}$, $B_{el. гр.}$, $B_{p.p.}$, $Z_{нал}$, – соответственно затраты на электроэнергию; сжатый воздух; техническую воду; амортизацию оснащения; эксплуатацию помещений; вольфрамовые электроды для плазмотронов; графитовые электроды; рабочую жидкость; отладку; $B_{ш}$, B_H , $B_{a.сп.}$ – соответственно стоимость штампов; комплекта ножей и специальных устройств и средств механизации и автоматизации.

В результате расчетов получены графики технологической себестоимости (см. например, рис. 3), на основании которых разработана схема выбора оптимального способа выполнения разделительных операций в зависимости от габарита обрабатываемого контура, толщины заготовки, требований к точности и программы выпуска (рис. 4), из которой следует, что в условиях единичного, мелкосерийного и среднесерийного производства при изготовлении листовых деталей способы ЭРО обеспечивают более высокую экономическую эффективность по сравнению с традиционными способами штамповки и механической обработки. Это позволяет утверждать, что развитие способов ЭРО – одно из главнейших направлений в развитии процессов обработки листовых деталей.

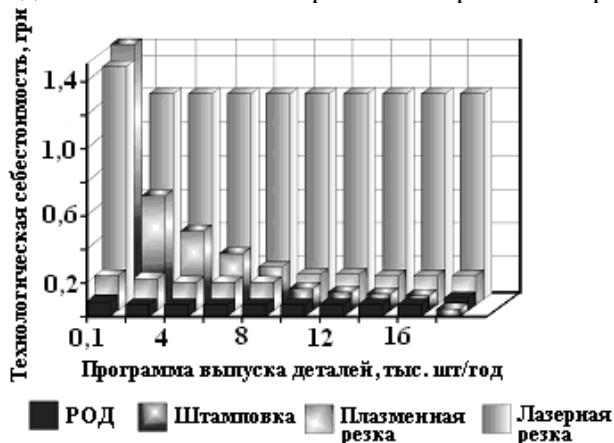


Рис. 3. Обобщенная диаграмма себестоимости изготовления фасонных листовых деталей периметром 200 мм при толщине 5 мм

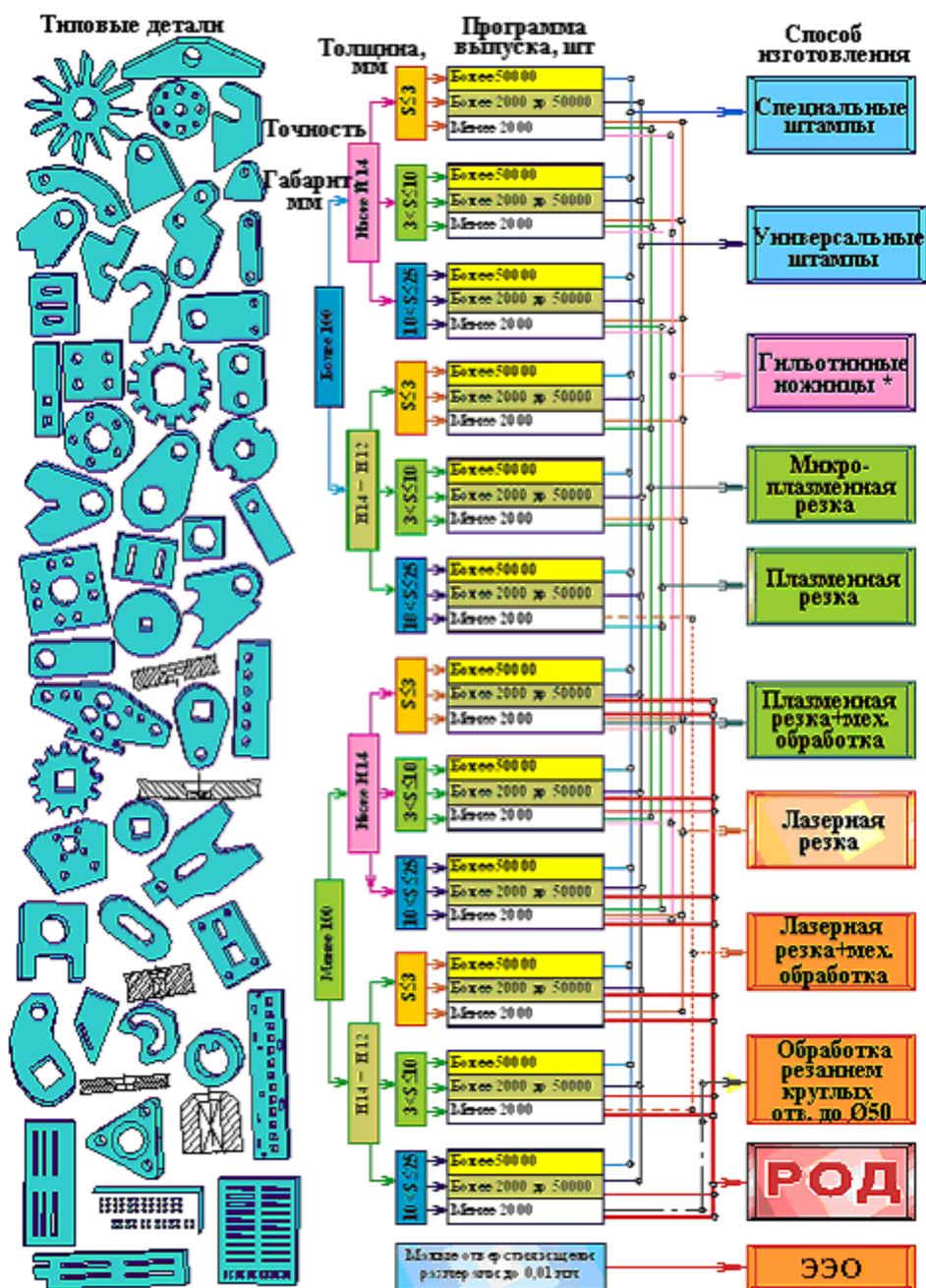


Рис. 4. Схема выбора оптимального способа выполнения разделительных операций листовых деталей

Выводы

Листовые детали изготавливают с использованием разделительных операций, обычно производимых штамповкой. Однако все операции в настоящее время можно осуществить также ЭРО, включающей способы ЭЭО, РОД и ПР. В этой связи возникает необходимость экономического обоснования и выбора оптимального варианта технологического процесса в каждом конкретном случае и в конечном счете определения областей рационального применения каждого из указанных способов.

В условиях единичного, мелко- и среднесерийного производства при изготовлении листовых деталей способы ЭРО обеспечивают более высокую экономическую эффективность и широкие технологические возможности по сравнению с традиционными штамповкой и механической обработкой. Поэтому они должны вытеснить традиционные технологии штамповки и механической обработки, а электрод в свою очередь – штамп и резец. В этом состоит одно из главнейших направлений в развитии процессов обработки листовых деталей.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Носуленко В.И.* Размерная обработка металлов электрической дугой // *Электронная обработка материалов.* 2005. № 1. С. 8–17.
2. *Чумаченко О.С.* Розмірна обробка електричною дугою листових деталей: Автореф. дис. канд. техн. наук: 05.03.07 / Кіровоградський держ. техн. ун-т. Киев, 2002.
3. *Носуленко В.И., Чумаченко О.С.* Розмірна обробка дугою для розділових операцій листового металу як альтернативний процес металообробки // *Збірник наукових праць КДТУ.* Вип. 6. Кіровоград, 2000.
4. *Носуленко В.И., Чумаченко О.С.* Розмірна обробка дугою фасонних отворів в листовому металі // Там же. Вип. 7. С. 216–221.
5. *Носуленко В.И., Чумаченко О.С.* Розмірна обробка дугою деталей з листового металу // *Вісник НТУУ КПІ.* 2002. Київ, С. 164–169.
6. *Носуленко В.И., Чумаченко О.С.* Комбинированные процессы металлообработки с использованием электрического дугового разряда // *Збірник наукових праць КДТУ.* 2001. Вип. 9. Кіровоград, С. 98–104.
7. *Чумаченко О.С.* Перспективи та область раціонального застосування розмірної обробки дугою листових деталей сільськогосподарської техніки // *Конструювання та експлуатація с/г машин.* 2001. Вип. 9. Кіровоград, С. 132–138.
8. *Носуленко В.И., Великий П.Н., Сиса О.Ф., Чумаченко О.С.* Электроэрозионные головки РОД к металлорежущим станкам // *Сварщик.* 2001. № 3. С. 30–32.
9. *Носуленко В.И., Великий П.Н., Сиса О.Ф., Чумаченко О.С.* Комбинированные процессы обработки с использованием электрического дугового разряда // Там же. 2001. № 6. С. 39.
10. *Носуленко В.И., Чумаченко О.С.* Альтернатива традиции – размерная обработка металлов электрической дугой // *Мир техники и технологий.* 2003. № 2. С. 52–55.
11. *Носуленко В.И.* Перспективи та області раціонального застосування процесу розмірної обробки металів електричною дугою // *Збірник наукових праць КДТУ.* 2003. Вип. 12. Кіровоград, С. 98–103.
12. *Носуленко В.И., Чумаченко О.С.* Электрическая дуга вместо штамповки // *Мир техники и технологий.* 2003. № 4. С. 52–55.

Поступила 10.05.04

Summary

It is shown that the processes of electrical discharge machining, including electroerosive handling, arc sizing machining and plasma cutting, at manufacturing of sheet details ensure higher economic efficiency and wider technological opportunities as a contrast to traditional techniques of punching and machining job and, consequently, should receive a preferential development.

А.И. Григорьев, С.О. Ширяева, А.Н. Жаров, В.А. Коромыслов

НЕЛИНЕЙНЫЕ ОСЦИЛЛЯЦИИ ЗАРЯЖЕННЫХ КАПЕЛЬ. Часть I. Аналитические и численные исследования общих закономерностей нелинейных осцилляций. Экспериментальные работы

*Ярославский государственный университет им. П.Г. Демидова,
ул. Советская, 14, г. Ярославль, 150000, Россия*

Исследование осцилляций заряженной капли в окрестности равновесной формы и их устойчивости представляет значительный интерес для различных разделов технической физики, научного приборостроения, геофизики и химической технологии (см., например, обзоры [1–16] и указанную литературу). В этой связи оно неоднократно проводилось как теоретически, так и экспериментально, в линейной и нелинейной постановках различной строгости. Большая часть исследований, проведенных к настоящему времени, выполнена в линейной постановке, а соответствующие работы достаточно подробно описаны в процитированных обзорах. Поэтому в изложении основное внимание будет уделено исследованиям осцилляций капель в нелинейных постановках.

1. Исследование нелинейных осесимметричных осцилляций капли и ее устойчивости по отношению к собственному заряду. Первое аналитическое исследование нелинейных осцилляций капель и пузырей в идеальной несжимаемой жидкости выполнено в 1983 г. Тсамопулосом и Брауном [17] асимптотическим методом Линдштедта–Пуанкаре с использованием пакета символьных компьютерных вычислений «MACSYMA 1977». Следует отметить, что успешно проведенные аналитические асимптотические анализы нелинейных осцилляций капель стали появляться только после широкого внедрения компьютерных пакетов аналитических символьных вычислений: ввиду большой громоздкости расчетов только проверка последних на компьютерах позволила приобрести уверенность в их справедливости.

Сами расчеты проводились по обычной схеме асимптотического анализа: исходная нелинейная задача после разложения по малому параметру сводилась к нескольким неоднородным линейным задачам различных порядков малости, а искомое решение представлялось в виде асимптотического разложения по малому параметру с коэффициентами, найденными при решении задач соответствующих порядков малости.

В [17] все расчеты проводились для одномодовой осесимметричной начальной деформации формы капли (пузыря), определяющейся вторым, третьим и четвертым полиномами Лежандра соответственно, начальное же распределение поля скоростей принималось нулевым. Центральносимметричные осцилляции пузыря не рассматривались. Аналитические выражения для формы капли (пузыря), потенциала поля скоростей течения жидкости для трех указанных видов начальной деформации выписаны с учетом слагаемых второго порядка малости по малому параметру ε , в качестве которого принималось отношение амплитуды начальной деформации к радиусу капли. В работе приведены рассчитанные контуры образующих линейно и нелинейно осциллирующих капель для указанных трех видов начальной деформации формы.

Поправка к частоте осцилляций, квадратичная по амплитуде осцилляций (по параметру ε), определялась (в трех частных случаях, когда начальное возмущение поверхности содержит только одну моду: вторую, третью или четвертую) в расчетах третьего порядка малости и учитывалась лишь в основном ($\sim \varepsilon$) слагаемом асимптотического разложения. Речь идет о выражении ви-

да $\sim \varepsilon \cdot \cos[(\omega - b \cdot \varepsilon^2)t]$. Несложно видеть, что, разложив такое выражение в ряд по ε , получим слагаемое $\sim bt$, содержащее малый параметр ε в третьей степени. Такая не совсем корректная форма записи результатов нелинейных асимптотических анализов, когда деформация поверхности и потенциал поля скоростей выписываются лишь во втором порядке по малому параметру, а нелинейная поправка к частоте – в третьем, является традиционной и используется в задачах о нелинейных осцилляциях жидких струй [18] и нелинейных периодических капиллярно-гравитационных волнах (волнах Стокса) [19]. Кроме того, в расчетах [17] выяснилось, что поправка к частоте осцилляций капли $\sim \varepsilon^3$ отсутствует.

Найденное в [17] снижение частоты осцилляций капли (пузыря) с увеличением их амплитуды хорошо согласовалось с ранее полученными результатами численного моделирования осцилляций капли вязкой жидкости [20], а также с результатами экспериментальных измерений [21]. Естественно, что сравнение теоретических результатов [17], полученных для идеальной жидкости, с результатами численных расчетов [20] проводилось в асимптотике малой вязкости, когда $\nu\sqrt{(\rho/\sigma R)} \ll 1$ (ρ – плотность жидкости; ν – коэффициент кинематической вязкости; σ – коэффициент поверхностного натяжения; R – радиус капли). В [17] также подтвержден отмеченный в [20, 21] факт временной асимметрии осцилляций: при начальном возбуждении основной моды, когда форма капли осциллирует между вытянутым и сплюснутым сфероидом, время нахождения капли (пузыря) в состоянии вытянутого сфероида превышает время ее нахождения в сплюснутом состоянии, и эта тенденция усиливается с увеличением амплитуды осцилляций.

Приведенные выражения для потенциальной и кинетической энергии осциллирующей капли во втором порядке малости в силу их квадратичности по амплитуде деформации равновесной формы и скорости течения жидкости соответственно целиком определены решениями линейного приближения, квадратичные поправки к величине деформации капли и полю скоростей течения жидкости в выписанные выражения не вошли, так как приводят к поправкам не ниже третьего порядка малости.

В [22] результаты, полученные в [17], обобщены на случай наличия на капле электрического заряда, жидкость же принималась электропроводной. Математическая формулировка задачи о нелинейных осцилляциях капли, использованная в [17], пополнена электростатической задачей расчета давления электрического поля собственного заряда нелинейно осциллирующей капли, связанной с чисто гидродинамической задачей [17] через динамическое граничное условие на свободной поверхности капли. Условие применимости электростатического приближения к расчету электрического поля у свободной поверхности, совершающей нелинейные осцилляции, выписано в виде требования малости характерного времени электропроводности в капле по сравнению с гидродинамическим временем (с характерным масштабом обезразмеривания времени): $\sqrt{(\rho \cdot R^3 / \sigma)} \gg (\chi / 4\pi \varepsilon_* \cdot R^2)$, здесь χ – удельное сопротивление жидкости, ε_* – диэлектрическая проницаемость воздуха (размерная). При расчетах использовался асимптотический метод многих временных масштабов [23], что позволило по сравнению с [17] найти положения внутренних нелинейных гармонических резонансов для взаимодействия мод осцилляций, возбуждающихся в заряженной капле во втором и третьем порядках малости, и построить решения, пригодные в окрестности резонанса четвертой и шестой мод. Сами расчеты проводились с использованием пакета символьных компьютерных вычислений «MACSYMA».

Найденные в [22] в расчетах второго порядка малости квадратичные по малому параметру компоненты решений (деформации формы капли, потенциала поля скоростей течения жидкости и электростатического потенциала в окрестности капли), а также поправки к частотам осцилляций, определяемые в расчетах третьего порядка малости, содержали в знаменателях множители вида $(\omega_m^2 - j^2 \cdot \omega_n^2)$, где ω_m и ω_n – частоты различных мод осцилляций капли; j – целое число. В некоторых ситуациях (при некоторых значениях собственного заряда капли Q , ее радиуса и величины коэффициента поверхностно натяжения) может выполняться соотношение $(\omega_m^2 - j^2 \cdot \omega_n^2) = 0$. Такие ситуации по аналогии с вынужденными гармоническими осцилляциями принято называть резонансными, поскольку в точках резонансов решения расходятся. В теории возмущений отработаны процедуры отыскания решений, как в окрестности, так и в самой точке резонанса [23] путем введения параметра расстройки, величина которого может непрерывно изменяться. В физических задачах параметры расстройки вводятся на основе изменения неких физических характеристик, которые ранее принимались фиксированными. В итоге резонансные компоненты решения сводятся к секулярным слагаемым, обрабатываемых в свою очередь в стандартных математических процедурах.

В [22] в расчетах второго порядка малости обнаружен резонанс между четвертой ($n=4$) и шестой ($n=6$) модами при некотором заряде капли Q_r , докритическом в смысле линейной устойчивости заряженной капли по отношению к собственному заряду (в смысле анализа устойчивости, проведенного Рэлеем [24]), $Q_r < Q_*$, здесь Q_* – критический заряд, при котором теряет устойчивость основная мода ($n=2$). Тсамопулос и Браун [22] ввели параметр расстройки на основе варьирования заряда капли Q в малой окрестности Q_r и построили решение, справедливое в самой точке резонанса и его окрестности. Показано, что в точке резонанса энергия полностью перекачивается из изначально возбужденной четвертой моды в шестую меньше чем за три периода осцилляций четвертой моды. Отмечено, что максимальная амплитуда шестой моды достигается в положении точного резонанса (при величине параметра расстройки, равной нулю) и что амплитуда шестой моды убывает по гиперболическому закону при увеличении абсолютной величины параметра расстройки.

В [22] показано, что резонансные ситуации между модами осцилляций реализуются и для незаряженной капли. В частности, такое взаимодействие для основной ($n=2$) и четвертой ($n=4$) мод обнаруживается в расчетах третьего порядка малости. Указанная степень малости приводит к существенному увеличению (на порядок) характерного времени обмена энергией между резонансно-взаимодействующими модами.

В заключение Тсамопулос и Браун [22] качественно оценивают возможное влияние малой вязкости на характерные черты нелинейных осцилляций. Так, они полагают, что результаты расчетов можно сравнивать с данными экспериментов с маловязкими каплями, когда характерное время затухания осцилляций, обусловленное вязкостью, много больше характерного временного масштаба осцилляций капли идеальной жидкости. Говоря о влиянии вязкости на резонансное взаимодействие, ученые полагают, что для резонансов второго порядка малости малая вязкость должна влиять на обе взаимодействующие моды одинаковым образом независимо от факта их взаимодействия. Это представляется неверным, ибо хорошо известно [25], что декременты вязкого затухания осцилляций капель существенно зависят от номеров мод и не могут быть одинаковы для разных мод. Для резонансов, обнаруживаемых в расчетах третьего порядка малости, влияние даже малой вязкости весьма существенно ввиду большой длительности характерного времени обмена энергией между резонансно-взаимодействующими модами.

Для сравнения результатов проведенного анализа с экспериментальными данными Тсамопулос и Браун [22] предлагают воспользоваться результатами экспериментов с электростатическим подвесом заряженных капель в поле сил тяжести, ссылаясь при этом на результаты расчета равновесной формы заряженной капли [26]. В [26] получено, что отклонение равновесной формы заряженной капли от сферической во внешнем электростатическом поле невелико. Такое предложение представляется излишне поспешным, ибо согласно результатам работ [27–29] поправки к частотам осцилляций капель во внешних электрических полях, связанные с отклонением формы капли от сферической (со сфероидальной деформацией), достаточно велики и имеют тот же порядок величины, что и поправки, связанные с нелинейностью осцилляций. Вопрос о нелинейных осцилляциях заряженной капли во внешнем электростатическом поле нуждается в отдельном исследовании, которое представляется весьма сложным даже по прошествии двух десятков лет со времени появления цитируемых работ Тсамопулоса и Брауна.

Следующей в порядке появления в свет и накопления информации о нелинейных осцилляциях капель и методах анализа подобных задач стала работа Тсамопулоса, Акиласа, Брауна [30], в которой проанализированы особенности нелинейных движений заряженной капли идеальной несжимаемой электропроводной жидкости, несущей заряд, весьма близкий к критическому в смысле устойчивости капли по отношению к собственному заряду. В отличие от цитированных работ Тсамопулоса и Брауна в [30] использовались условия двух типов: 1) начальное распределение поля скоростей принималось нулевым, а исходная деформация задавалась виртуальным возмущением основной ($n=2$) моды; 2) в начальный момент времени величины поля скоростей и деформаций поверхности принимались отличными от нуля. Показано, что переход от устойчивых осцилляций в окрестности равновесной сферической формы при заряде, близком к критическому в смысле линейной устойчивости к неустойчивым движениям, связанным с нарастанием амплитуды основной моды (с деформацией к семейству сплюснутых и вытянутых сфероидов), является транскритической бифуркацией.

Следует отметить, что некоторые компоненты решений, полученных в [22], содержат квадрат частоты ω_2^2 осцилляций основной моды ($n=2$) в знаменателях в качестве сомножителя, а так как при приближении заряда капли Q к критическому значению Q_* частота $\omega_2 \rightarrow 0$, то соответствующие решения расходятся и становятся непригодными. В этой связи построение решений, пригодных в пределе $Q \rightarrow Q_*$, требует устранения возникающих расходимостей. В [30] эта цель достигается путем

введения зависимости Q_* от малого параметра ε , характеризующего начальную сфероидальную деформацию, по аналогии с тем, как в [18] исследовалась нелинейная устойчивость жидкой струи в окрестности критического волнового числа. Сама идея зависимости величины собственного заряда, критической для начала распада заряженной капли, от степени сфероидальной деформации высказана еще Бором и Вилером [31] в связи с разработкой капельной модели ядра атома (одновременно с работой [30] идея положена в основу анализа физического механизма реализации неустойчивости капли по отношению к собственному заряду в [28] и неустойчивости незаряженной капли в однородном внешнем электростатическом поле [29]).

В [30] весь анализ проводился как асимптотическими, так и численными методами (методом конечных элементов). Результаты асимптотического и численного анализа в [30] хорошо согласуются между собой. Устойчивость нелинейных осцилляций капли, имеющей заряд, близкий к критическому (отличающийся от критического на величину первого порядка малости), исследуется в терминах теории бифуркаций. При отыскании решения второго порядка малости, когда начальная деформация определяется основной модой, в получающихся функциях неоднородностей нулю приравниваются слагаемые, приводящие к появлению секулярных членов. Суперпозиция таких слагаемых дает так называемое «условие разрешимости»: обыкновенное нелинейное дифференциальное уравнение второго порядка, описывающее временную эволюцию амплитуды основной моды осцилляций. Бифуркационный анализ такого уравнения показал, что при докритических в смысле линейной устойчивости величинах собственного заряда нелинейные осцилляции основной моды капли остаются устойчивыми, если их амплитуда не превышает определенного значения, зависящего от отклонения величины заряда капли от критической. В противном случае капля претерпевает неустойчивость. Точка бифуркации при выполнении условия $Q < Q_*$ является устойчивой (центром), при $Q > Q_*$ – неустойчивой (седлом).

В [30] показано, что начальная деформация заряженной сферической капли к вытянутому сфероиду снижает величину критического заряда для распада капли. Деформация капли к сплюснутому сфероиду увеличивает ее устойчивость по отношению к собственному заряду, если ограничить рассмотрение осесимметричными виртуальными осцилляциями (этот результат впоследствии будет подтвержден в численных анализах Басарана и Скривена [32–33]). Дальнейшая судьба неустойчивой по отношению к собственному заряду вытянутой сфероидальной капли в [30] трактуется в рамках представлений о ее делении на части сравнимых размеров, и численно рассчитываются формы делящейся капли в различные моменты времени. Однако построенная в [30] картина распада не согласуется с многочисленными экспериментами по проверке справедливости критерия Рэлея (см., например, обзоры [11, 12, 15]), в которых утверждается, что неустойчивая капля, сбросив заметную часть своего заряда, сохраняет практически неизменной свою массу (точнее говоря, изменение массы капли находится в пределах погрешности измерений [34]). В этой связи предлагаемый в [35] распад неустойчивой капли путем сброса с ее вершин серии высокодисперсных сильно заряженных капелек представляется более адекватным экспериментальным данным. Вопрос об устойчивости сплюснутой сфероидальной капли по отношению к неосесимметричным деформациям в [30] изучается, но ответа на него нет ввиду сложности предполагаемого анализа.

2. Исследование устойчивости заряженной капли по отношению к неосесимметричным осцилляциям. Устойчивость заряженной капли, имеющей форму сплюснутого сфероида, по отношению к неосесимметричным деформациям исследована позднее [36–38]. В [36–37] в рамках линейного анализа показано, что по достижении зарядом сплюснутой капли рэлеевского предела она становится неустойчивой по отношению к неосесимметричным деформациям $\sim P_2^2(\cos\theta)$. В [38] выписано выражение для потенциальной энергии заряженной капли, имеющей форму трехосного эллипсоида, и показано, что потенциальная энергия сплюснутой сфероидальной капли больше энергии трехосной эллипсоидальной, которая в свою очередь больше энергии вытянутой сфероидальной капли. Таким образом, заряженной до рэлеевского предела сплюснутой сфероидальной капле энергетически выгодно деформироваться к форме трехосного эллипсоида, которому в свою очередь энергетически выгодно деформироваться к неустойчивой вытянутой сфероидальной форме.

Нелинейное резонансное взаимодействие пятой ($n=5$) и восьмой ($n=8$), а также десятой ($n=10$) и шестнадцатой ($n=16$) мод в незаряженной капле идеальной несжимаемой жидкости рассмотрено Натараньяном и Брауном в [39]. Само исследование проведено в рамках Лагранжева метода, ранее использованного при изучении капиллярно гравитационных волн на поверхности воды. В выписываемый лагранжиан вводятся в соответствии с идеей метода разных временных масштабов быстрое (характеризующее решения первого порядка малости) и медленное (характеризующее реше-

ния второго порядка малости и в том числе нелинейное взаимодействие мод) времени. Начальная деформация указывается суперпозицией пары взаимодействующих мод: 5 и 8 или 10 и 16. Затем лагранжиан усредняется по быстрому времени. Уравнения Эйлера–Лагранжа, соответствующие оставшейся после усреднения части Пагранжиана, содержат медленное время и описывают квадратичное по малому параметру взаимодействие мод, определяющих начальную деформацию. Результаты расчетов резонансного обмена энергией между взаимодействующими модами в случае осесимметричных осцилляций зависят от парциального вклада взаимодействующих мод в начальную деформацию.

В [39] показано, что если не ограничивать рассмотрение осесимметричными модами осцилляций, то следует учесть, что с m -ой осесимметричной модой связаны $(2m+1)$ неосесимметричных мод с одинаковыми частотами и близкими величинами энергии их возбуждения и осесимметричные моды неустойчивы в смысле передачи своей энергии в связанные с ними неосесимметричные моды. В итоге энергия, изначально заключенная в виртуально возбужденной в начальный момент времени осесимметричной m -ой моде, «размазывается» по $(2m+1)$ неосесимметричным модам. При возбуждении в начальный момент двух резонансно-взаимодействующих мод с высокими номерами количество связанных с ними неосесимметричных мод оказывается весьма большим и обмен энергией между взаимодействующими неосесимметричными модами носит стохастический характер.

Внутреннее резонансное взаимодействие мод, реализующееся в третьем порядке малости, выполненное с использованием Лагранжева формализма, исследовано Натараньяном и Брауном в [40]. В экспериментах Тринча и Ванга [41], которые исследовали возбуждаемые акустическим полем осцилляции большой амплитуды капель в акустическом подвесе, оказалось, что осцилляции большой амплитуды весьма трудно возбудить вследствие появления на поверхности капли неосесимметричной бегущей волны, которая в конце концов приводила к вращению капли как целого. Такой же эффект проявлялся и в экспериментах Якоби и др. [42] со свободно висющими в условиях невесомости каплями, осцилляции которых генерировались акустическим полем. Натараньян и Браун предположили, что такое поведение акустически возбуждаемых левитирующих капель связано с реализацией в каплях резонанса третьего порядка с участием неосесимметричных мод. Отмечено, что кроме резонанса третьего порядка между второй ($n=2$) и четвертой ($n=4$) модами, для которых выполняется условие $\omega_4 \pm 3 \cdot \omega_2 = 0$ [22], существуют резонансы третьего порядка между $(2m+1)$ неосесимметричными модами, связанными с m осесимметричной модой. Возбуждение таких резонансов и может привести к вращению капли как целого. В [40] исследованы в рамках Лагранжева метода резонансное взаимодействие между неосесимметричными модами, связанными с третьей модой ($m=3$), и между второй ($n=2$) и четвертой ($n=4$) модами с учетом влияния связанных с ними неосесимметричных мод. Показано, что при начальном возбуждении третьей осесимметричной моды ($n=3, m=0$) неосесимметричная тессеральная мода $\sim P_3^2(\theta, \varphi)$ (то есть $n=3, m=2$) претерпевает неустойчивость, что в итоге может привести к вращению капли как целого. Для ситуации начального возбуждения второй ($n=2$) и четвертой ($n=4$) мод, резонансно между собой взаимодействующих, претерпевает неустойчивость неосесимметричная тессеральная мода $\sim P_4^2(\theta, \varphi)$ (то есть $n=4, m=2$), что также может привести к вращению капли как целого. Тем не менее результаты [40] вызывают сомнение, поскольку нелинейная поправка к частоте третьей моды, полученная в [40], отличается от найденной ранее в строгом гидродинамическом анализе [22], и авторы [40] утверждают, что результаты их последнего расчета нуждаются в независимой проверке на предмет наличия ошибок. Сама идея возможности перекачки без постороннего силового воздействия энергии из осесимметричных мод капли в неосесимметричные, сопровождающейся понижением порядка симметрии реализующихся осцилляций, представляется сомнительной, хотя для системы взаимодействующих точечных осцилляторов перекачка энергии из высоких мод в низкие отмечена и даже получила специальное название – «распадная неустойчивость» [43]. В экспериментах [41, 42] направленное силовое воздействие на каплю со стороны акустического поля есть, и возникновение в итоге вращения капли как целого не представляется необычным, чего нельзя сказать о проводимом в [40] анализе.

Следует отметить, что сама идея возможности внутреннего резонансного взаимодействия мод осцилляций с различной симметрией не вызывает никаких возражений. Тщательного рассмотрения требует вопрос о направлении перекачки энергии при реализации внутреннего резонансного взаимодействия. Во всех цитированных работах при упоминании о нелинейном внутреннем резонансном взаимодействии мод речь шла о так называемом вырожденном трехмодовом резонансе, когда одна мода дважды взаимодействует с другой. В реальности вырожденное внутреннее нелинейное резонансное взаимодействие мод обладает асимметрией [44–46] и энергия, запасенная в модах, определяющих начальную деформацию капли, перекачивается только из мод с малыми номерами в моды с

большими номерами. Обратная перекачка энергии из высоких мод в низкие идет лишь в рамках той доли энергии, которая поступила из низких мод в высокие. Если же в реальности взаимодействуют три моды с различными номерами, то говорят о вторичном комбинационном резонансе, при котором возможна перекачка энергии из определяющих начальную деформацию капли мод с высокими номерами в моду с низким номером, отсутствующую в спектре мод, определяющих начальную деформацию [45].

Вопрос о направлении перекачки энергии между резонансно-взаимодействующими модами осцилляций капли с различной симметрией до сих пор не исследовался, но такое исследование выполнено для волн на поверхности заряженной струи идеальной несжимаемой жидкости [46]. Выяснилось, что перекачка энергии из неосесимметричной моды в осесимметричную может произойти, но обратный перенос не реализуется.

В заключение в [40] кратко на качественном уровне обсуждается возможная роль вязкости в реализации нелинейных осцилляций капли.

Влияние возбуждения неосесимметричных мод на распад заряженной капли идеальной электропроводной несжимаемой жидкости исследовано Натараньяном и Брауном в [47] в рамках классического гидродинамического анализа. В работе доведено до конца исследование, начатое в [30]. Точнее говоря, распространено на случай неосесимметричных мод осцилляций, что позволило правильно истолковать закономерности реализации неустойчивости капли, заряженной до рэлеевского предела, претерпевшей виртуальную деформацию к сплюснутому сфероиду. Показано, что сплюснутая, заряженная выше рэлеевского предела капля неустойчива по отношению к неосесимметричным осцилляциям, что независимо подтверждено в [36–38]. Причина такого обстоятельства в том, что согласно [38] потенциальная энергия трехосного сильно заряженного сфероида меньше потенциальной энергии сплюснутой сфероидальной капли и переход от осесимметричной формы капли к неосесимметричной выгоден энергетически. Показано, что при докритическом в смысле линейной устойчивости заряде устойчивых неосесимметричных форм капли не существует.

В [47] рассмотрение проводится в рамках асимптотического метода многих масштабов в предположении, что параметр Рэлея W капли отличается критического на величину порядка малого параметра ε , в качестве которого берется отношение амплитуды начальной деформации капли к радиусу. Разложения уравнения формы поверхности капли, потенциала поля скоростей течения жидкости и электростатического потенциала проводятся по корню квадратному из малого параметра: $\sqrt{\varepsilon}$. Основанием для такого выбора параметра разложения является следующее обстоятельство. Пусть параметр Рэлея W , характеризующий устойчивость капли по отношению к собственному заряду ($W \equiv (Q^2/4\pi R^3\sigma)$) и входящий в определение частоты линейных осцилляций заряженной капли:

$$\omega_n^2 \equiv n(n-1)[(n+2) - W],$$

отличается от критического $W_* = W_2$, равного 4 ($W_* = 4$), на величину порядка малого параметра ε : $W \approx W_* + b \cdot \varepsilon$, то частота осцилляций основной моды (развитие которой собственно и определяет механизм реализации неустойчивости [28–29]) будет пропорциональна корню квадратному из малого параметра $\omega_2 \approx \sqrt{b \cdot \varepsilon}$.

Кроме анализа устойчивости заряженной капли по отношению к неосесимметричным модам осцилляций в [47] проведено исследование влияния на устойчивость заряженной сферической капли таких нарушающих ее центральную симметрию факторов, как наличие однородного внешнего электростатического поля, приводящего к деформации капли по полю к фигуре, близкой к вытянутому сфероиду, и вращения капли как целого, приводящего к деформации капли к фигуре, близкой к сплюснутому сфероиду. Оба случая ранее проанализированы численно методом конечных элементов в [26, 48]. Результаты, полученные в [47], в общих чертах хорошо согласуются с данными численных расчетов [26, 48], но содержат существенно более подробную информацию о закономерностях эволюции капель при разных способах нарушения их центральной симметрии. В частности, в [47] показано, что наличие однородного внешнего электростатического поля любой величины снижает устойчивость заряженной капли в смысле снижения величины собственного заряда, при котором реализуется неустойчивость. В [47] продолжен бифуркационный анализ устойчивости капли, начатый в [30]. Выяснилось, что в присутствии однородного внешнего электростатического поля переход от устойчивых состояний капли к неустойчивым соответствует суперкритической бифуркации. Влияние вращения на форму и устойчивость заряженной капли более сложно: в зависимости от соотношения ве-

личины заряда капли и величины момента ее количества движения, связанного с вращением, она может принимать устойчивые формы сплюснутых сфероидов, устойчивые сплюснутые неосесимметричные формы (определяющиеся различными сферическими функциями) и претерпевать неустойчивость в соответствии с субкритической бифуркацией.

В работе [49] развивается численное исследование равновесных форм и устойчивости заряженной капли электропроводной жидкости, начатое в [30]. По сравнению с [30], где для численного анализа использовался метод конечных элементов, пригодный лишь для малых отклонений формы капли от сферической, в [49] применялась комбинация метода граничных элементов и метода конечных элементов, позволяющая анализировать произвольные деформации заряженных капель. Кроме того, в [49] учитывались не только осесимметричные, но и неосесимметричные моды осцилляций, что существенно расширило круг вопросов, на которые удалось ответить. В ходе проведенных расчетов подтверждены результаты работы [30], в частности показано, что на рэлеевском пределе заряда четные моды осцилляций претерпевают транскритическую бифуркацию. Кроме того, на рэлеевском пределе заряда нечетные моды в зависимости от начальных условий способны претерпевать либо субкритическую, либо суперкритическую бифуркации. Выяснилось, что развитие неустойчивости четных мод, связанных с удлинением капли вдоль оси симметрии, заканчивается образованием на вершинах капли конических выступов (конусов Тейлора) с углами, близкими к ранее полученным в экспериментах Тейлора [50]. Развитие неустойчивости нечетных мод, асимметричных относительно экваториальной плоскости, также заканчивается образованием на осесимметричной вершине капли конического выступа. Проанализирована возможность деления неустойчивых капель на две части сравнимых размеров, а также на множество более мелких (когда неустойчивость капли реализуется с образованием на вершинах капли конических выступов).

На этом заканчивается цикл теоретических работ [17, 22, 30, 39–40, 47, 49], посвященных асимптотическому исследованию аналитическими и численными методами нелинейных осцилляций капли, выполненных коллективом авторов, принадлежащих к одной группе: Р.А. Брауном, Дж.А. Тсамопулосом, Р. Натараньяном, П.М. Адорнато, Н.А. Пелеказисом, Т.Р. Акиласом. Указанные работы отличаются высоким уровнем использованного математического аппарата и скупостью описания процедуры расчета. Как правило, всякая последующая публикация этих авторов в полной мере использует результаты ранее опубликованных работ, отсылая читателя за деталями расчетов к ранее опубликованным статьям, так что пользоваться ими можно, когда они имеются в наличии одновременно. Но даже и при этом условии работы трудночитаемы, так как все промежуточные расчеты, как правило, опускаются и приводятся лишь окончательные результаты. Плохо то, что некоторые работы содержат и описки, и ошибки, исправить которые можно, только повторив все расчеты заново. Форма, в которой приводятся результаты, не всегда удобна для восприятия, и часто приходится просто верить авторам «на слово». Сказанное касается, например, внутренних резонансов незаряженной капли. В [17], где, собственно, должна идти речь об открытии резонансов и их положении, нет об этом ни слова, а из приведенных итоговых формул их не видно. В [22], посвященной заряженной капле, содержится лишь словесное указание на существование в третьем порядке малости резонансного взаимодействия второй и четвертой мод, формул же, подтверждающих сказанное, не приводится. В [39] без приведения аналитических выражений и без ссылок на расчеты говорится о двух резонансах, реализующихся во втором порядке малости между пятой и восьмой, десятой и шестнадцатой модами незаряженной капли. В [40] опять-таки без приведения аналитических выражений исследуются резонансы, реализующиеся в третьем порядке малости: упомянутый в [22] резонанс между второй и четвертой модами и, безусловно, совсем экзотический резонанс между неосесимметричными осцилляциями одной моды. Тем не менее аналитические работы указанной группы авторов явились пионерскими в аналитическом исследовании нелинейных осцилляций капель.

3. Численные расчеты нелинейных осцилляций и устойчивости заряженных капель. Учет влияния вязкости. С численными расчетами нелинейных осцилляций капель, кроме авторов группы Р.А. Брауна, связаны имена О.А. Басарана и Л.Е. Скривена [32–33, 48, 51–52]. Их работы отличаются изощренной техникой численных расчетов, включающей комбинации многих известных и вновь разработанных методов (напомним, что в группе Р.А. Брауна при численных расчетах использовался в основном метод конечных элементов и лишь в одной работе – его комбинация с методом граничных элементов). Если говорить о недостатках работ, то они характерны для большинства численных исследований: результаты расчетов не выходят за рамки использованных при расчете математических моделей, их прогностические возможности весьма малы и подвергаются избыточной математической формализации.

Заметная часть численных анализов нелинейных осцилляций капель посвящена учету влияния вязкости жидкости на нелинейные осцилляции капель [52–54]. Сама по себе постановка проблемы, безусловно, полезна и своевременна, но результаты вызывают сомнения. В работе [53] для учета влияния вязкости модифицируется метод поверхностных потенциалов [55], строго обоснованный только для описания безвихревых движений идеальной жидкости. Модификация к описанию течения вязкой жидкости происходит с помощью некорректного использования идей метода пограничного слоя. Некорректность проявляется в том, что граничное условие на касательные натяжения, ответственное для корректной формулировки задачи в процедуре решения, предложенной в [53], оказывается неиспользованным. В [54] численные расчеты проводятся на основе расширения вариационного принципа Гаусса на случай вязкой жидкости, что заведомо некорректно, поскольку еще в [56, 57] показано, что использовать вариационные принципы для описания движения вязкой жидкости нельзя.

Следует отметить, что строгий учет влияния вязкости в задачах о нелинейных осцилляциях и периодических волнах на свободной поверхности жидкости (на границе раздела несмешивающихся жидкостей) до сих пор представляет проблему как для обсуждаемой сферической, так и цилиндрической, и плоской свободной поверхности жидкости. Только в последнее время появились положительные сдвиги в описании нелинейных капиллярно-гравитационных волн типа Стокса на плоской поверхности жидкости [58–60]. Попытка строго описать нелинейные осцилляции капли вязкой жидкости, предпринятая в [61], окончилась неудачно ввиду крайней громоздкости выражений, получающихся уже во втором порядке малости.

Следует отметить, что в [54], так же как и в более ранней работе тех же авторов [62], выполненной для приближения идеальной жидкости, содержится существенная ошибка в постановке задачи, дающая неверные результаты расчетов второго порядка малости. Авторы [54, 62] ошибочно полагают, что центр масс нелинейно осциллирующей капли также совершает осцилляции, и, считая систему отсчета, связанную с центром масс капли, неинерциальной, вводят в уравнение движения жидкости дополнительное слагаемое, пропорциональное ускорению центра масс капли. Забывается известная теорема механики, согласно которой никакими движениями внутри замкнутой системы нельзя добиться движения центра масс. Как показано в [63], в ситуации, когда в спектре мод, определяющих начальную деформацию нелинейно осциллирующей капли, содержится несколько мод с последовательно возрастающими номерами, происходит возбуждение во втором порядке малости трансляционной моды ($n=1$), центр же масс капли остается неподвижным.

4. Экспериментальные наблюдения нелинейных деформаций и осцилляций капель. Работа [62] кроме ошибочных теоретических расчетов содержит описание весьма интересных экспериментальных измерений временной зависимости амплитуды нелинейно осциллирующих капель. Капли получались при дроблении струй (диаметром 100–300 мкм), и, следовательно, осцилляции совершались при наличии начальной деформации, которая визуальнo фиксировалась, и отличном от нулевого начальном распределении поля скоростей течения жидкости в капле, которое не контролировалось. Оторвавшиеся капли пролетали в поле зрения следящей оптической системы, позволявшей проводить измерения амплитуд осцилляций как функций времени с высокой точностью. Результаты измерений представлены в виде зависимости амплитуды осцилляций от времени, на которых хорошо прослеживается затухание, связанное с вязкостью. Эксперименты проводились с 95% раствором этанола при атмосферном давлении воздуха и комнатной температуре. Физико-химические характеристики (вязкость, коэффициент поверхностного натяжения и плотность) контролировались стандартными методами с приемлемой точностью.

Уместно отметить, что экспериментальное наблюдение осцилляций капель большой амплитуды проводилось различными средствами [21, 41–42, 64–66]. Так, в [21] капля подвешивалась в не смешивающейся с жидкостью среде такой же плотности, и в капле возбуждались осцилляции большой амплитуды. Трудность в интерпретации количественных результатов экспериментов связана с возможными вариациями величины коэффициента межфазного натяжения; в совместном влиянии на затухание осцилляций вязкости и жидкости и среды. В [41] капля подвешивалась в поле сил тяжести в акустическом подвесе. В этом случае давление акустического поля существенно деформировало каплю. Наблюдение за нелинейными осцилляциями капли в условиях невесомости (на «Шаттле»), предпринятое в [42, 64], по всей видимости, является оптимальным для количественных измерений характеристик нелинейных осцилляций капель. Интересная методика экспериментов нелинейных трехмерных осцилляций капли ртути массой 13,6 г использована в [65]. Капля ртути помещалась на дно закрытого сосуда с раствором электролита. При пропускании через электролит переменного тока регулируемой частоты в капле возбуждались нелинейные осцилляции, которые фиксировались на видеокамеру. Чтобы капля приняла сферическую форму, сосуд, в котором она находилась, сбрасыв-

вался с десятиметровой вышки, так что капля во время падения находилась в состоянии, близком к невесомости. Результаты экспериментов представлены в виде кинограмм. Приведена математическая модель параметрических трехмерных нелинейных осцилляций вязкой капли под действием периодически изменяющегося внешнего давления, получаемая из принципа Лагранжа по аналогии с тем, как это делалось в [30, 40], в виде нелинейных уравнений Матье. Результаты проведенного теоретического анализа удовлетворительно согласуются с данными собственных экспериментов. Тем не менее полученные результаты теоретического анализа сомнительны согласно [55–56] ввиду применения вариационных принципов к описанию движения капли вязкой жидкости.

В [66–68] приведены результаты экспериментального исследования нелинейных стадий реализации неустойчивости незаряженных капель в однородных внешних электростатических полях. В [66, 68] эксперименты проводились с каплями, взвешенными в жидких внешних средах равной плотности, в [67] – с каплями в условиях невесомости (на борту самолета, летящего по параболической траектории). В работах прослежена динамика деформации капель в однородном внешнем электростатическом поле вплоть до реализации неустойчивости.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 03–01–00760 и гранта Президента РФ № МК 2946.2004.01.

ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Vaily A.G.* Electrostatic atomization of liquids (revue) // *Sci. Prog., Oxf.* 1974. V.61. P. 555–581.
2. *Коженков В.И., Фукс Н.А.* Электрогидродинамическое распыление жидкости (обзор) // *Успехи химии.* 1976. Т.45. № 12. С. 2274–2284.
3. *Vogy D.B.* Drop formation in a circular liquid jet//*Ann. Rev. Fluid Mech.* 1979. V.11. P. 207–228.
4. *Гонор А.Л., Ривкин В.Я.* Динамика капли // *Сб. Итоги науки и техники. Серия: Механика жидкости и газа.* Т.17. М., 1982. С. 98–159.
5. *Габович М. Д.* Жидкометаллические источники ионов (обзор) // *УФН.* 1983. Т.140. №.1. С.137–151.
6. *Блаженков В.В., Дмитриев А.С., Шишов В.В.* Монодиспергирование вещества (от опытов Савара до современных технологий: ретроспектива и перспективы) // *Тр. Моск. энерг. ин-та.* 1983. Вып. 615. С. 3–14.
7. *Bailey A.G.* The Theory and practice of electrostatic spraying (revue)//*Atomization and Spray Technology.* 1986. V. 2. P. 95–134.
8. *Дудников В.Г., Шабалин А.Л.* Электрогидродинамические источники ионных пучков (обзор) // *Препринт 87-63 ИЯФ СО АН СССР.* Новосибирск, 1987.
9. *Ширяева С.О., Григорьев А.И., Сыщиков Ю.В.* Электростатическое монодиспергирование жидкостей как метод получения двухфазных систем (обзор) // *ЖПХ.* 1989. Т. 62. № 9. С. 2020–2026.
10. *Fenn J.B., Mann M., Meng C.K. et al.* Electrospray ionization for mass spectrometry of large biomolecules (revue) // *Science.* 1989. V.246. № 4926. P. 64–71.
11. *Григорьев А.И.* Неустойчивости заряженных капель в электрических полях (обзор) // *ЭОМ.* 1990. № 6. С. 23–32.
12. *Григорьев А.И., Ширяева С.О., Шевченко С.И.* ЭГД неустойчивости в дисперсных системах (обзор) // *Научное приборостроение.* 1991. Т.1. № 3. С. 25–43.
13. *Шевченко С.И., Григорьев А.И., Ширяева С.О.* ЭГД распыление жидкости (обзор) // *Научное приборостроение.* 1991. Т. 1. № 4. С. 3–21.
14. *Ширяева С.О., Григорьев А.И., Святченко А.А.* Классификация режимов работы электрогидродинамических источников жидкокапельных пучков (обзор) // *Препринт ИМ РАН № 25.* Ярославль, 1993.
15. *Григорьев А.И., Ширяева С.О.* Капиллярные неустойчивости заряженной поверхности капель и электродиспергирование жидкостей (обзор) // *Изв. РАН. МЖГ.* 1994. № 3. С. 3–22.
16. *Белоножко Д.Ф., Григорьев А.И.* Деление заряженных капель во внешнем электрическом поле на части сравнимых размеров (обзор) // *Электронная обработка материалов.* 2000. № 4. С. 17–27.
17. *Tsamopolous J.A., Brown R.A.* Nonlinear oscillations of inviscid drops and bubbles // *J. Fluid Mech.* 1983. V.127. P. 519–537.
18. *Nayfeh F.H.* Nonlinear stability of a liquid jet // *Phys. Fluids.* 1970. V.13. № 4. P.841–847.
19. *Nayfeh A.H.* // *Phys. Fluids.* 1970. V.13. № 3. P. 545–550.
20. *Foote G.B.* A numerical method for studying simple drop behavior: simple oscillation // *J. Comp. Phys.* 1973. V.11. P. 507–530.

21. *Trinch E., Wang T.G.* Large amplitude drop oscillations // Proc. 2-nd Int. Colloq. on Drop and Bubbles. Pasadena: 1982. JPL Publication 82–87.
22. *Tsamopolous J.A., Brown R.A.* Resonant oscillations of inviscid charged drops // J. Fluid Mech. 1984. V.147. P. 373–395.
23. *Найфе А.Х.* Методы возмущений. М., 1976.
24. *Rayleigh, Lord.* On equilibrium of liquid conducting masses charged with electricity // Phil. Mag. 1882. V.14. P.184–186.
25. *Ламб Г.* Гидродинамика. Л., 1947.
26. *Adornato P.M., Brown R.A.* Shape and stability of electrostatically levitated drops // Proc. R. Soc., London. 1983. V. A389. P. 101–117.
27. *Cheng K.J.* Capillary oscillations of a drop in an electric field // Phys. Lett. 1985. V.A112. №11. P.392–396.
28. *Григорьев А.И.* О механизме неустойчивости заряженной проводящей капли // ЖТФ. 1985. Вып.7. С. 1272–1278.
29. *Григорьев А.И., Синкевич О.А.* К механизму развития неустойчивости капли жидкости в электростатическом поле // Изв. Ан СССР. МЖГ. 1985. № 6. С. 10–15.
30. *Tsamopolous J.A., Akylas T.R., Brown R.A.* Dynamics of charged drop break-up. // Proc. R. Soc., London. 1985. V. A401. P.67–88.
31. *Bohr N., Wheeler J.A.* The mechanism of nuclear fission // Phys. Rev. 1939. V. 56. P. 426–450.
32. *Basaran O.A., Scriven L.E.* Axisymmetric shapes and stability of isolated charged drops // Phys. Fluids. 1989. V.A1. № 5. P. 795–798.
33. *Basaran O.A., Scriven L.E.* Axisymmetric shapes and stability of charged drops in an external electric fields // Phys. Fluids. 1989. V.A1. № 5. P. 799–809.
34. *Schweizer J.W., Hanson D.N.* Stability limit of charged drops // J. Coll. Int. Sci. 1971. V.35. № 3. P.417–423.
35. *Grigor'ev A.I., Shiryayeva S.O.* The theoretical consideration of physical regularities of the electrostatic dispersion of liquids as aerosols // J. Aerosol Sci. 1994. V.25. № 6. P. 1079–1091.
36. *Григорьев А.И., Фирстов А.А.* Критические условия неустойчивости заряженной капли, имеющей форму сплюснутого сфероида // Электронная обработка материалов. 1992. № 6. С. 20–23.
37. *Григорьев А.И., Ширяева С.О.* Критические условия неустойчивости сплюснутой сфероидальной сильно заряженной капли. // ЖТФ. 1999. Т. 69. Вып.7. С.10–14.
38. *Щукин С.И., Григорьев А.И.* Устойчивость заряженной капли, имеющей форму трехосного эллипсоида // ЖТФ. 1998. Т.68. Вып.11. С.48–51.
39. *Natarajan R., Brown R.A.* Quadratic resonance in the three-dimensional oscillation of inviscid drops with surface tension // Phys. Fluids. 1986. V. 29. № 9. P. 2788–2797.
40. *Natarajan R., Brown R.A.* Third-order resonance effects and the nonlinear stability of drops oscillations // J. Fluid Mech. 1987. V.183. P.95–121.
41. *Trinch E., Wang T.G.* Large amplitude free and driven drop-shape oscillations: experimental observations // J. Fluid Mech. 1982. V.122. P.315–338.
42. *Jakobi N., Croonquist A.P., Elleman D.D., Wang T.G.* Acoustically induced oscillations and rotation of a large drop in Space // Proc. 2-nd Int. Colloq. on Drop and Bubbles. Pasadena: 1982. JPL Publication 82-7. P.31
43. *Рабинович М.И., Трубецков Д.И.* Введение в теорию колебаний и волн. М., 1984.
44. *Ширяева С.О.* Асимметрия нелинейного резонансного взаимодействия мод капиллярных осцилляций заряженной капли // Письма в ЖТФ. 2000. Т. 26. Вып.22. С.76–83.
45. *Ширяева С.О.* О внутреннем резонансе мод нелинейно осциллирующей объемно заряженной диэлектрической капли // ЖТФ. 2003. Т.73. Вып.2. С.19–30.
46. *Ширяева С.О., Григорьев А.И., Левчук Т.В.* Нелинейный аналитический асимптотический анализ осцилляций неосесимметричных мод заряженной струи идеальной жидкости // ЖТФ. 2004. Т.74. Вып.8. С. 6–14.
47. *Natarajan R., Brown R.A.* The role of three-dimensional shapes in the break-up charged drops // Proc. R. Soc., London. 1987. V.A410. P.209–227.
48. *Brown R.A., Scriven L.E.* The shape and stability of rotating liquid drop // Proc. R. Soc., London. 1980. V.A371. P.331–357.

49. *Pelekasis N.A., Tsamopolous J.A., Manolis G.D.* Equilibrium shape and stability of charged and conducting drops // *Phys. Fluids*. 1990. V.A2. № 8. P. 1328–1340.
50. *Taylor G.I.* Disintegration of water drops in an electric field // *Proc. R. Soc., London*. 1964. V.A280. P.383–397.
51. *Patzek T.W., Benner R.E., Basaran O.A., Scriven L.E.* Nonlinear oscillations of inviscid free drops // *J. Computational Physics*. 1991. V.97. P. 489–515.
52. *Basaran O.A.* Nonlinear oscillations of viscous drops // *J. Fluid Mech.* 1992. V. 241. P.169–198.
53. *Lundgren T.S., Mansour N.N.* Oscillation of drops in zero gravity with weak viscous effects // *J. Fluid Mech.* 1988. V. 194. P. 479–510.
54. *Becker E., Hiller W.J., Kowalewski T.A.* Nonlinear dynamics of viscous droplets // *J. Fluid Mech.* 1994. V. 258. P.191–216.
55. *Baker G.R., Merion D.I., Orzag S.A.* Generalized vortex methods for free-surface flow problems // *J. Fluid Mech.* 1982. V.123. P. 477–501.
56. *Millikan C.B.* On the steady motion of viscous, incompressible fluids; with particular reference to a variation principle // *Phil. Mag.* 1929. V.7. S.7. № 44. P. 641–662.
57. *Bateman H.* On dissipative systems and related variational principles // *Phys. Rev.* 1931. V. 38. August 15. P. 815–819.
58. *Белоножко Д.Ф., Григорьев А.И.* Нелинейные движения вязкой жидкости со свободной поверхностью // *Изв. РАН. МЖГ*. 1993. № 2. С. 184–192.
59. *Белоножко Д.Ф., Григорьев А.И.* Нелинейные периодические волны на заряженной поверхности вязкой электропроводной жидкости // *ЖТФ*. 2003. Т. 73. Вып. 11. С. 37–45.
60. *Белоножко Д.Ф., Григорьев А.И.* Нелинейные периодические волны на заряженной поверхности глубокой электропроводной маловязкой жидкости // *ЖТФ*. 2004. Т. 74. Вып. 3. С. 5–13.
61. *Ширяева С.О., Белоножко Д.Ф., Световой В.Б., Григорьев А.И.* Формулировка задач об аналитическом расчете нелинейных движений вязкой жидкости со свободной поверхностью. Препринт №31. ИМИ РАН. Ярославль, 2001.
62. *Becker E., Hiller W.J., Kowalewski T.A.* Experimental and theoretical investigation of large amplitude oscillations of liquid droplets // *J. Fluid Mech.* 1991. V. 231. P. 189–210.
63. *Ширяева С.О.* Нелинейные осцилляции заряженной капли при начальном возбуждении соседних мод // *ЖТФ*. 2002. Т. 72. Вып. 4. С. 15–22.
64. *Wang T.G., Anilkumar A.V., Lee C.P.* Oscillations of liquid drops: results from USML-1 experiments in Space // *J. Fluid Mech.* 1996. V. 308. P. 1–14.
65. *Azuma H., Yoshinara S.* Three-dimensional large-amplitude drop oscillations: experiments and theoretical analysis // *J. Fluid Mech.* 1999. V. 393. P. 309–332.
66. *Inculet I.I., Kroman R.* Breakup of large water droplets by electric fields // *IEEE Transactions on Ind. Appl.* 1992. V. 28. № 5. P. 945–948.
67. *Inculet I.I., Floryan J.M., Haywood R.J.* Dynamic of water droplets in electric fields // *IEEE Transactions on Ind. Appl.* 1989. V. 25. № 5. P. 1203–1209.
68. *Jong-Wook Ha, Seunng-Man Yang.* Deformation and breakup of Newtonian and non-Newtonian conducting drops in an electric field // *J. Fluid Mech.* 2000. V. 405. P. 131–156.

Поступила 22.09.04

Summary

Review of scientific publications on the theoretical and experimental investigations of nonlinear oscillations of charged drops is given. The stability of charged drops stability in reference to its own charge; as well as the influence of oscillation amplitude and internal resonance interaction on the drop stability are discussed.

ЯВЛЕНИЕ КУМУЛЯЦИИ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ВИХРЕВЫХ КОЛЕЦ (ЧАСТЬ II. ОБСУЖДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ)

*Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины,
просп. Октябрьский, 43 А, г. Николаев, 54018, Украина*

Одна из первых попыток теоретически описать явление [1] исходя из внутренней баллистики активной разрядной зоны плазменного ускорителя с водой в качестве рабочей среды была предпринята в соответствии с современными представлениями об импульсных течениях соответствующей геометрии без учета сил вязкости, действующих в приграничных со стенкой активной зоны слоях жидкости. Анализ показал, что ни один из расчетных режимов (в том числе и соответствующих экспериментальным) не обнаруживает кумуляцию на продольной оси ультраструи, хотя и показывает в первые моменты истечения скорость в этой зоне на 10–15% большую скорости участков, находящихся на расстоянии половины радиуса струи. В целом же скорость плавно снижается от оси к внешней границе ультраструи. Заметим, что расчетная скорость ультраструи соответствует скорости струи, получаемой экспериментально. Выявилось недопонимание природной сути наблюдаемого явления.

Внимательное изучение материалов известных [2, 3] экспериментальных исследований высоконапорных импульсных струй воды, генерируемых импульсными водометами [4], показало, что характер истечения жидкости из плазменного ускорителя с конденсированной средой существенно иной. Струи, генерируемые плазменным ускорителем, в отличие от [2, 3] оказываются значительно более устойчивыми; здесь имеются четко разделенные участки кумулятивной струи и ультраструи, они не разрушаются при взаимодействии в сверхзвуковом движении сквозь плотный воздух атмосферы, но, очевидно, только стабилизируются. Высоконапорные импульсные струи [2, 3] не имеют кумулятивных выбросов и движутся, фактически разрушаясь при взаимодействии с воздухом, превращаясь в облако брызг. Таким образом, их морфология, динамика и течения существенно отличаются от наблюдаемых для струй, генерируемых плазменным ускорителем и взаимодействующими в ультраструе вихревыми кольцами (см. рис. 1).

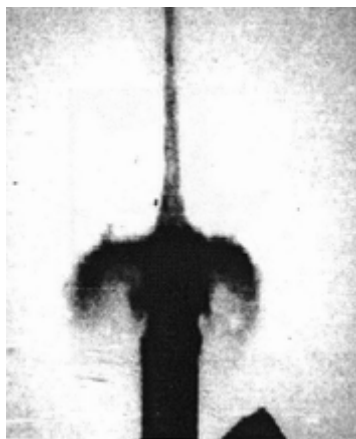


Рис. 1. Кадр кинограммы истечения ультраструи воды из плазменного ускорителя (хорошо видны взаимодействующие вихревые кольца, выбрасывающие кумулятивную струю)

Столь противоположное влияние плотного атмосферного воздуха, в одном случае стабилизирующего устойчивость импульсной струи, в другом – способствующего потере устойчивости, может объясняться только различием структур истекающих струй. Воздух не дает возможность быстро раз-

валиться вихревым кольцам в ультразвуке и соответственно способствует "игре" водяных вихревых колец [5] в ней. Это подтверждает эксперимент по метанию плазменным ускорителем ультразвуков из плазменного ускорителя в вакуумируемую камеру. С понижением давления воздуха в камере ультразвуки становятся неустойчивыми, и при давлении ниже 0,06 МПа кумулятивные выбросы не образуются (см. рис. 2), а первое вихревое кольцо сразу после выхода за срез ускорителя теряет устойчивость и разваливается. Иное дело – движение метаемых ультразвуков в плотном воздухе.

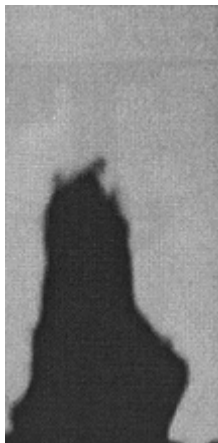


Рис. 2. Выброс ультразвуки в вакуумируемую камеру (виден "развал" вихревого кольца)

Процесс пронизывания плотного воздуха высокоскоростной водяной ультразвукой без потери устойчивости существенно облегчается за счет того, что она вместе с "играющими" вихревыми кольцами генерирует кумулятивный выброс, движущийся со скоростью, превышающей скорость звука в воздухе. То есть "материнская" ультразвука движется с дозвуковой (хотя и высокой) скоростью фактически внутри пространства, ограниченного конической, воздушной ударной волной, порождаемой головой кумулятивной струи (см. рис. 3), вернее, в маловозмущенной и менее плотной среде, возникающей за срезом ударной волны. Это те процессы, которые происходят вне плазменного ускорителя. Все же отличия начинаются внутри плазменного ускорителя, в его активной разрядной зоне.



Рис. 3. Схема расходящегося фронта ударной волны, порождаемой при движении со сверхзвуковой скоростью кумулятивной струи

Активная зона плазменного ускорителя представлена на рис. 4, где электрод–анод 1, электрод–катод 2, проходной изолятор 5 и свободная поверхность жидкости образуют характерное коак-

сиально-коническое пространство, в котором и находится метаемая доза жидкости 3. Выбрасывает жидкость плазменное образование 4, образующееся (изначально у внутренней торцевой поверхности проходного изолятора) после включения внешнего разрядного контура б.

Механизм формирования в активной зоне плазменного ускорителя ультраструй, а затем вне активной зоны кумулятивных струй жидкости следующий. За счет несимметричности магнитного давления тока разряда в радиально-щелевом пространстве активной зоны и особенности гидродинамики течения жидкости в кольцевом канале того же пространства участки сомкнутого плазменного образования, прилегающие к аноду 1, движутся быстрее, чем участки струи, по радиусу более удаленные от центральной оси. Соответственно с самого начала процесса ускорения приосевые участки жидкости приобретают большую скорость, придавая границе раздела плазма–жидкость коноидальную форму. Основной токовый слой простирается именно под этой поверхностью. На выходе из активной зоны за анодом в приосевой области непрерывно поддерживается зона пониженного давления. Граница раздела плазменный поршень–вода, двигаясь на выход из активной зоны, под действием изменения газокINETического и магнитного давлений пульсирует, ее скорость изменяется (см. рис. 5) в соответствии с изменением тока в разрядном контуре.

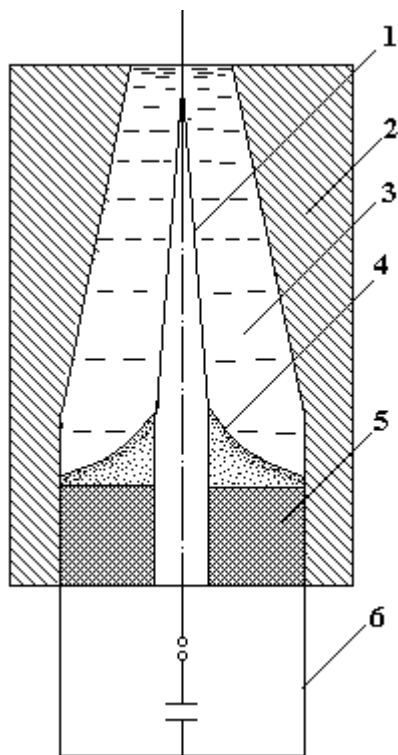


Рис. 4. Схема активной зоны плазменного ускорителя

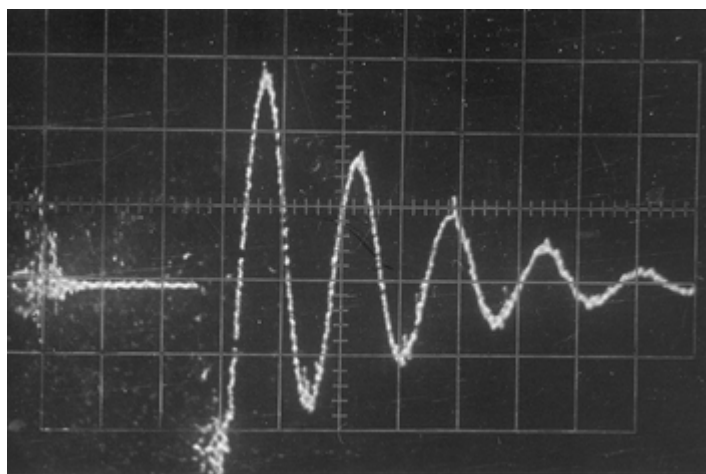


Рис. 5. Осциллограмма тока в разрядном контуре плазменного ускорителя (соответствует свечению плазменного поршня разряда на рис.5 в первой части данной статьи)

За счет наличия сил трения и вязкости при таком пульсирующем режиме ускорения на внешней границе вязкого подслоя у стенок, ограничивающих активную зону, начинается [6, 7] интенсивный рост турбулентных вихрей, их попарное слияние и формирование группы вихревых колец, ускоряемых на выходе из активной зоны. Дальнейший генезис системы взаимодействующих вихревых колец в ультраструе подробно рассмотрен в [8, 9], а макрокартина генерирования кумулятивного выброса может быть уточнена логически [10].

Характерным для систем вихревых колец является то, что вихревые линии представляют собой замкнутые окружности, центры которых расположены на одной прямой. Впервые такой класс движений вихрей в идеальной безграничной жидкости рассмотрен Г. Гельмгольцем [11], установившим, что вихревое кольцо малого конечного поперечного сечения движется, не изменяя радиуса центра тяжести поперечного сечения, с постоянной, но весьма большой скоростью, направленной в сторону, куда жидкость течет сквозь кольцо. В то же время у вихревого кольца обнаружено замечательное свойство – продвигаться на сравнительно большие (в сравнении с собственными размерами) расстояния, сохраняя во времени свою устойчивую форму. При определенных внешних воздействиях,

производящих как бы смыкание траекторий движения частиц жидкости в завихренности (внутренний диаметр тора вихревого кольца $d \rightarrow 0$), вихревое кольцо превращается в движущийся сферический вихрь (вихрь Хилла). Установлено [12], что при уменьшении d^4 от $a^4/4$ до 0 (здесь a – радиус сферического вихря Хилла) время полного оборота возрастает с $4a\pi/3Z$ до ∞ (Z – скорость вихря вдоль направления поступательного движения). Это важнейшее свойство вихревых колец, позволяющее в дальнейшем понять основу возникновения кумуляции при взаимодействии вихревых структур.

В экспериментальных исследованиях процессов истечения импульсных ультраструй из плазменных ускорителей обнаружено, что при определенных режимах метания жидкости (воды) возникает нетривиальное явление возбуждения вихревых колец непосредственно в ультраструе. Их всегда больше двух.

Теоретические исследования процессов взаимодействия нескольких вихревых колец наталкиваются на огромные математические трудности, и в настоящее время решение таких задач не существует [15]. Поэтому внимательное изучение полученных экспериментальных данных особенно интересно.

Вероятно, для генерируемых в плазменном ускорителе вихревых колец "автоматически" обеспечивается равенство скоростей колец на бесконечности, и кольца образуют связанную систему. Подведенная к системе начальная энергия значительно больше энергии вихревых колец на бесконечном удалении. Известно [15], что чем больше начальная энергия взаимодействия колец, тем на меньшее расстояние отходят они друг от друга, что хорошо видно на соответствующих кадрах наших кинограмм.

Переднее вихревое кольцо, движущееся в реальной ультраструе, в условиях сжатия потока еще на выходе из активной зоны плазменного ускорителя, за счет вязкого взаимодействия сходящихся струйных течений, превращается в вихрь Хилла.

Построенное [5] точное решение – сферический вихрь Хилла – позволило детально анализировать явление. В работах [13, 14] исследовалась реакция сферического вихря Хилла на некоторые осесимметричные возмущения его поверхности. Установлены интересные детали поведенческих реакций вихря Хилла при таких возмущениях. Так, при незначительном растяжении сферы вдоль оси движения, то есть когда вихрь Хилла в начальный момент имеет форму вытянутого сфероида, определенная часть завихренной жидкости вытягивается в виде длинного шлейфа вниз по течению, провоцируя процесс кумулятивного выброса жидкости (см. рис. 6), тогда как основная часть массы завихренной жидкости остается в сферической форме. Но подторможенный вихрь Хилла догоняет вихревое кольцо, шедшее вторым, охватывает его и "выжимает" содержимое в шлейф, как кумулятивную струю.

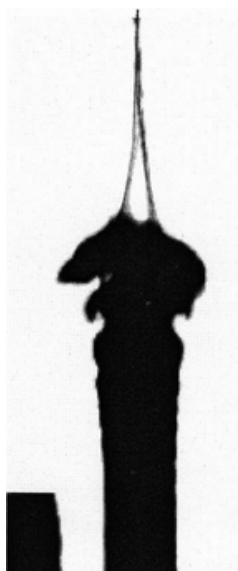


Рис. 6. Кумулятивный выброс жидкости из ультраструи при взаимодействии вихря Хилла

Если начальная форма вихря является сплюснутым сфероидом, то картина будет иной. Безвихревая жидкость будет захватываться через кормовую точку, продвигаться внутри вихря и почти достигать носовой точки. В отсутствие шлейфа кумулятивный выброс не может образоваться, а истекающая ультраструя тормозится на вихре Хилла и принимает в головной части грибообразную форму (см. рис. 7).

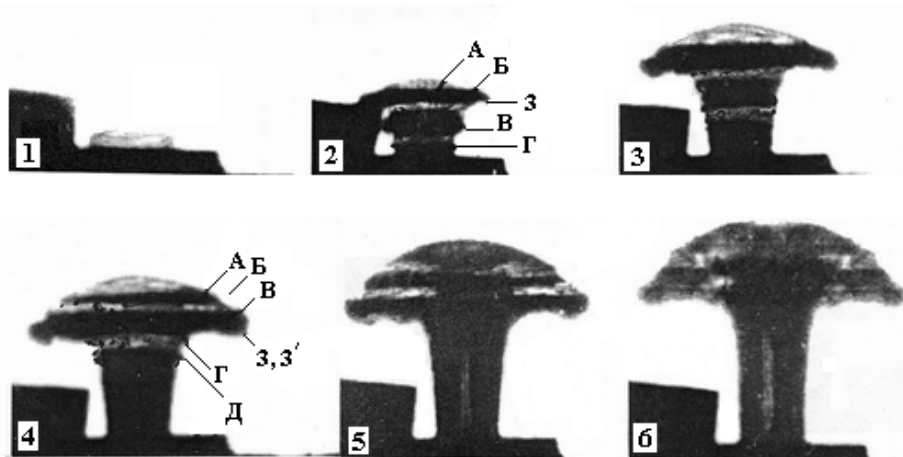


Рис. 7. Ультрасструя с кумуляцией, заторможенной на вихре Хилла

Таким образом, при экспериментальных исследованиях импульсных плазменных ускорителей, работающих в конденсированной среде, обнаружено новое, интересное явление возбуждения вихревых колец в метаемой струе, их взаимодействие между собой, с генерированием кумулятивных выбросов по оси основной ультрасструи. Подробно рассмотрен механизм возникновения необычной формы кумуляции, который в дальнейшем позволит построить теоретическую модель явления.

ЛИТЕРАТУРА

1. Малюшевский П.П., Канивец В.В., Голубенко Ю.Г., Семко А.Н. Формирование импульсных струй жидкости при направленном электрическом разряде // Тез. докл. 6-го Всесоюзного съезда по теоретической и прикладной механике. 1966. С. 204.
2. Бородин В.П., Войцеховский В.В. Применение искровой съемки для исследования высоконапорных импульсных струй // Журнал ПМТФ. 1965. № 3. С. 100–102.
3. Бородин В.П. Исследование высоконапорных импульсных струй при помощи рентгенографии // Журнал ПМТФ. 1985. № 5. С. 160–162.
4. Лаврентьев М.А., Антонов Э.А., Войцеховский В.В. Вопросы теории и практики импульсных водяных струй. Новосибирск: Ин-т гидродинамики СО АН СССР, 1961.
5. Лаврентьев М.А., Шабат Б.В. Проблемы гидродинамики и их математические модели. М., 1977.
6. Сурков С.В. О каскадном характере роста турбулентных вихрей // Инж. физ. журнал. 1985. Т. 48. С. 561–568.
7. Фабрикант Н.Я. Аэродинамика. М., 1964.
8. А.с. №313588 СССР, МКИ В21D 26/00. Способ получения высоких и сверхвысоких давлений / П.П. Малюшевский // Бюл. "Открытия. Изобретения". 1976. № 35. С. 135.
9. Малюшевский П.П. О механизме формирования кумулятивных струй при метании жидкости плазменным ускорителем // Известия АН СССР. Механика жидкости и газа. 1988. № 5. С. 39–44.
10. Мелешко В.В., Константинов М.Ю. Динамика вихревых структур. Киев, 1993.
11. Гельмгольц Г. Два исследования по гидродинамике. М., 1902.
12. Hill M.J.M. On a spherical vortex // Ibid, 1894. A 185. P. 213–245.
13. Moffatt H.K., Moore D.W. The response of Hill's spherical vortex to a small axisymmetric disturbance // J. Fluid Mech. 1978. 87, pt. 4. P. 749–760.
14. Pozrikidis C. The nonlinear instability of Hill's vorte // J. Fluid Mech. 1986. 168. P. 337–367.
15. Гуржий А.А., Константинов М.Ю., Мелешко В.В. Взаимодействие коаксиальных вихревых колец в идеальной жидкости // Изв. АН СССР. Механика жидкости и газа. 1988. № 2. С. 78–84.

Поступила 28.07.04

Summary

At experimental researches of pulse plasma boosters working in a condensed medium, the new, interesting phenomenon of excitation of vortex rings in thrown jet, their interaction with the other ones, with generation of hollow-charge lets on the axis of the main ultra-spray is revealed. Qualitatively, with the usage of a phenomenon "the vortex of Hill", the mechanism of cumulation arising is considered. It will allow to develop an idealized model of the phenomenon.

ИНИЦИИРОВАНИЕ ОКИСЛИТЕЛЬНО-ВОССТАНОВИТЕЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ В РАСТВОРАХ ЭЛЕКТРОЛИТОВ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ

*Институт химии растворов РАН,
ул. Академическая, 1, г. Иваново, 153045, Россия*

Введение

Тлеющий разряд атмосферного давления с электролитным электродом инициирует протекание в растворе различных окислительно-восстановительных процессов. В настоящее время в ряде работ рассматриваются возможности применения газовых разрядов для очистки воды от различных, преимущественно органических загрязнений.

Однако окислительно-восстановительные процессы, протекающие под действием плазменной обработки в растворах неорганических соединений, исследовались лишь для веществ в основном в условиях пониженного давления [1–13]. В частности, в работе [8] исследовалось окисление гексацианоферрата-II-калия под действием тлеющего разряда в условиях пониженного давления (50 торр, ток 75 мА). Изучение же механизма действия газовых разрядов атмосферного давления на электролиты в системе плазма-раствор с целью практического использования систем требует более детальных исследований.

Цель работы – исследование процесса окисления гексацианоферрата-II-калия (желтой кровяной соли) в гексацианоферрат-III-калия (красную кровяную соль) под действием положительного тлеющего разряда атмосферного давления. Исследовалось влияние начальной концентрации $K_4[Fe(CN)_6]$ и тока разряда на кинетику накопления $K_3[Fe(CN)_6]$, а также добавок хлорида калия в качестве катализатора разложения пероксида водорода и различных спиртов в качестве акцепторов OH^* – радикалов на окисление гексацианоферрата-II-калия.

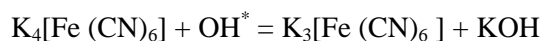
Методика эксперимента

В работе изучалось накопление красной кровяной соли под действием положительного тлеющего разряда атмосферного давления между электродом-острием в газовой фазе и поверхностью водного раствора электролита. Токи разряда составляли 5 и 10 мА, напряжение на электродах не превышало 50 кОм. Объем обрабатываемого раствора равнялся 400 мл. Концентрация образовавшейся красной кровяной соли определялась спектрофотометрически на длине волны 418 нм. Изменение спектра поглощения гексацианоферрата-III-калия в процессе обработки тлеющим разрядом показано на рис. 1.

Схема установки представлена на рис. 2. Использовалась проточная система объемом 400 мл с кварцевой ячейкой, через которую фокусировалось излучение галогеновой лампы на входную щель монохроматора с дифракционной решеткой. Сигнал на выходе монохроматора регистрировался фотозащитным элементом Ф-4, усиливался усилителем постоянного тока и через аналого-цифровой преобразователь (miniLAB-1008) передавался на компьютер. Калибровка измерительной схемы производилась по раствору гексацианоферрата-III-калия, приготовленному по точной навеске соли. В качестве рабочих растворов использовались растворы гексацианоферрата-II-калия с концентрациями: 0,005–0,0001 моль/л.

Экспериментальные результаты и их обсуждение

При воздействии положительного тлеющего разряда атмосферного давления с электролитным катодом под действием ионной бомбардировки в области катодного пятна образуются гидроксил-радикалы, являющиеся сильным окислителем ($E^0 = 2,8$ В). Вторичным продуктом действия разряда является пероксид водорода, который также служит сильным окислителем ($E^0 = 1,78$ В). Таким образом, предполагается, что в растворе $K_4[Fe(CN)_6]$ протекает окисление гексацианоферрата-II-калия в гексацианоферрат-III-калия:



или

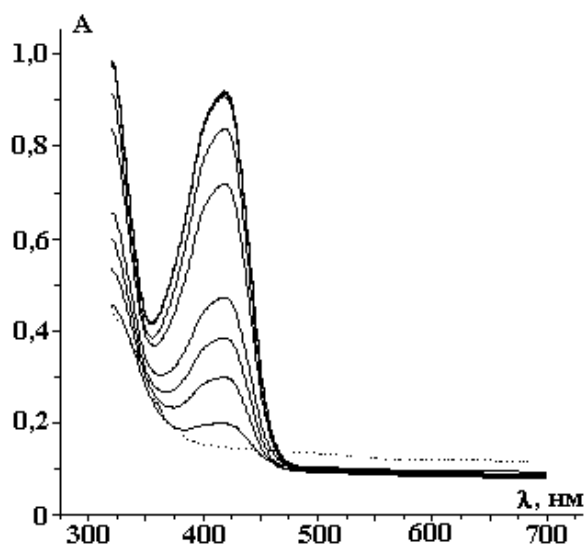
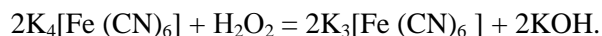


Рис. 1. Изменение амплитуды A спектра поглощения гексацианоферрата-III-калия. C_0 жкс = $=1 \cdot 10^{-3}$ моль/л, объем обрабатываемого раствора 400 мл, ток разряда 10 мА

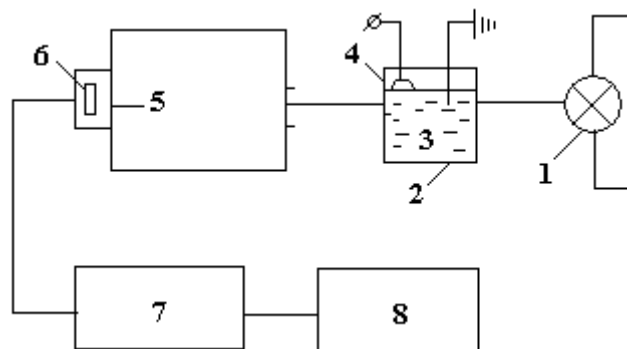


Рис. 2. Принципиальная схема установки для фотометрического определения гексацианоферрата-II-калия. 1 – источник излучения; 2 – кварцевая ячейка; 3 – раствор электролита; 4 – зона плазмы; 5 – монохроматор; 6 – фотоземель и усилитель; 7 – аналого-цифровой преобразователь; 8 – компьютер

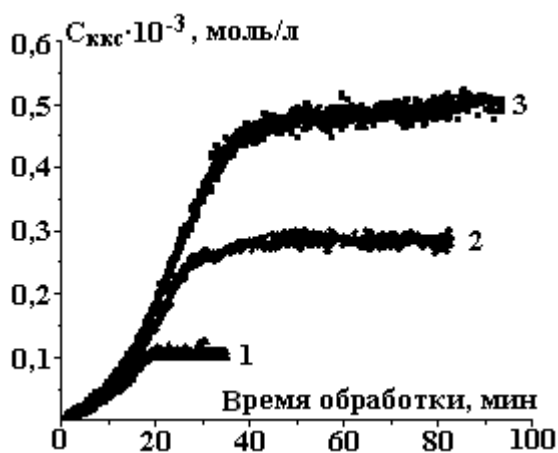


Рис. 3. Зависимость накопления гексацианоферрата-III-калия от начальной концентрации гексацианоферрата-II-калия, моль/л: 1 – $0,1 \cdot 10^{-3}$; 2 – $0,25 \cdot 10^{-3}$; 3 – $0,5 \cdot 10^{-3}$ моль/л

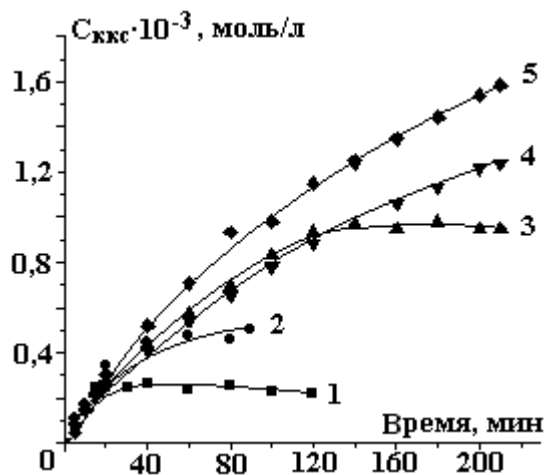


Рис. 4. Кинетические кривые накопления гексацианоферрата-III-калия в зависимости от начальной концентрации гексацианоферрата-II-калия, моль/л: 1 – $0,25 \cdot 10^{-3}$; 2 – $0,5 \cdot 10^{-3}$; 3 – $1,0 \cdot 10^{-3}$; 4 – $2,0 \cdot 10^{-3}$; 5 – $5,0 \cdot 10^{-3}$ моль/л

Кинетические кривые окисления гексацианоферрата-II-калия в зависимости от его начальной концентрации для токов 5 и 10 мА приведены соответственно на рис. 3 и 4. Концентрация $K_3[Fe(CN)_6]$ увеличивается со временем обработки и при различных временах (в зависимости от исходной концентрации гексацианоферрата-II-калия) выходит на стационарную величину. Стационарная концентрация красной кровяной соли равна исходной концентрации желтой кровяной соли. Этот факт свидетельствует о том, что практически весь гексацианоферрат-II-калия окисляется в гексацианоферрат-III-калия. Достигнутая стационарная концентрация $K_3[Fe(CN)_6]$ не изменяется в течение длительного времени. Это свидетельствует о том, что обратный процесс восстановления гексациано-

феррата-III-калия в гексацианоферрат-II-калия либо не протекает, либо протекает со скоростью, пренебрежимо малой по сравнению со скоростью процесса окисления. В наших экспериментах также не наблюдалось перехода красной кровяной в берлинскую лазурь или турбуллевую синь.

Из кинетических зависимостей видно, что начальные участки кривых практически совпадают. Это означает, что начальная скорость окисления гексацианоферрата-III-калия весьма слабо зависит от исходной концентрации гексацианоферрата-II-калия.

Пример кинетических зависимостей накопления гексацианоферрата-III-калия при различных токах разряда представлен на рис. 5. Очевидно, что при токе 10 мА скорость накопления продукта окисления значительно больше, чем при токе 5 мА.

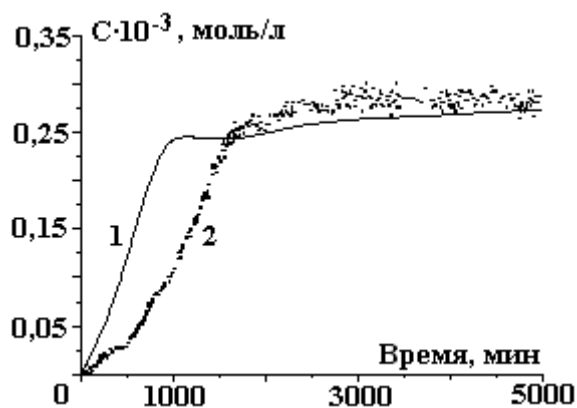


Рис. 5. Накопление красной кровяной соли при токах 10 (1) и 5 мА (2). $C_{0(K_4[Fe(CN)_6])} = 0,00025$ моль/л

По начальным участкам кинетических зависимостей рассчитаны начальные скорости окисления гексацианоферрата-II-калия для различных токов разряда и выходы по току (число молекул гексацианоферрата-III-калия, образующегося на один падающий однозарядный ион).

Расчет выхода по току проводился по формуле

$$f = R_0 \cdot V \cdot N_A / (N_A \cdot I / F),$$

где R_0 – скорость генерации гексацианоферрата-III-калия в начальный момент времени, моль/(л·с); V – объем обрабатываемого раствора, л; N_A – число Авогадро ($6,02 \cdot 10^{23}$ моль⁻¹); I – сила тока; F – постоянная Фарадея ($9,46 \cdot 10^4$ моль/зар). Результаты расчетов приведены в таблице.

Начальные скорости окисления гексацианоферрата-II-калия и выходы по току для различных условий горения разряда

Ток разряда, мА	$C_{0K_4[Fe(CN)_6]}$ моль/л	Начальная скорость окисления, моль/(л·с)	Выход по току, число молекул ККС/пад.ион
10	0,005	$2,27 \cdot 10^{-7}$	0,876
	0,002	$1,91 \cdot 10^{-7}$	0,736
	0,001	$1,99 \cdot 10^{-7}$	0,766
	0,0005	$2,34 \cdot 10^{-7}$	0,899
	0,00025	$2,45 \cdot 10^{-7}$	0,943
5	0,0005	$9,04 \cdot 10^{-8}$	0,697
	0,00025	$7,28 \cdot 10^{-8}$	0,561
	0,001	$6,83 \cdot 10^{-8}$	0,526

Как видно из представленных в таблице данных, выходы по току не превышают 1.

Известно, что основными первичными химически активными частицами, образующимися под действием ионной бомбардировки в тонком поверхностном слое раствора, являются радикалы H^* , OH^* и сольватированные электроны. Пероксид водорода образуется в результате рекомбинации радикалов OH^* . В то же время ответ на вопрос о том, какие частицы инициируют окислительно-восстановительные процессы, существенным образом зависит от физико-химических свойств раствора, например от таких, как pH и наличие растворенного кислорода. Роль активных частиц, образу-

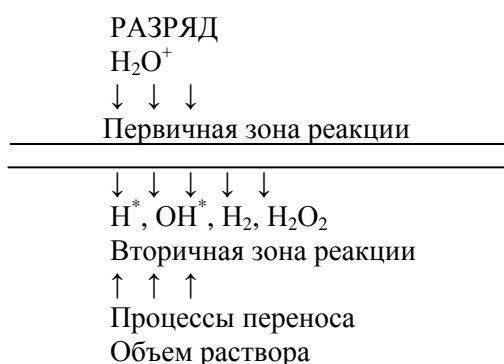
щихся в зоне плазмы, в иницировании конкретных реакций в растворах электролитов практически не исследована. Вопрос о вкладе в процесс первичных (OH^*) и вторичных (H_2O_2) агентов представляется весьма актуальным.

Окисление желтой кровяной соли в ходе разрядной обработки ее водного раствора может протекать как под действием гидроксил-радикала, так и под действием пероксида водорода. Сделано предположение, что, изменяя концентрации окисляющих частиц, можно определить, какой из окислителей участвует в реакции. В качестве акцепторов гидроксил-радикалов использовались этанол, изопропанол, бутанол-1 с концентрацией 0,001 моль/л. Рабочим раствором служил 0,5 мМ $\text{K}_4[\text{Fe}(\text{CN})_6]$. Оказалось, что добавки различных спиртов не оказывают влияния на скорость окисления гексацианоферрата-II-калия. Увеличение концентрации спирта до 0,01 моль/л также не изменило ход кинетических кривых, то есть в рамках условий эксперимента добавки спиртов-«ловушек» не меняют концентрацию гидроксил-радикалов.

Согласно данным, приведенным в [14], хлорид-ион концентрацией $\geq 0,02$ моль/л обладает каталитическим действием на процесс разложения пероксида водорода. Если окисляющим агентом в данном случае является H_2O_2 , то его разложение в присутствии хлорид-ионов приведет к уменьшению скорости окисления гексацианоферрата-II-калия. Эксперименты проводились раствором желтой кровяной соли с начальной концентрацией 0,0005 моль/л. Они показали, что присутствие KCl с концентрацией 0,1 моль/л не повлияло на скорость окисления гексацианоферрата-II-калия. Добавление пероксида водорода в систему (до концентрации, близкой к получаемой в ходе плазмохимической обработки) приводит к значительному ускорению окисления желтой кровяной соли. То есть можно сделать вывод о том, что окисление $\text{K}_3[\text{Fe}(\text{CN})_6]$ происходит за счет взаимодействия с гидроксил-радикалами. Почему же тогда добавление акцепторов OH^* -радикалов в систему не оказывает влияния на ход окисления гексацианоферрата-II-калия? Ответить на этот вопрос можно, дав оценки свойствам первичной зоны реакции и взаимодействия первичных активных частиц в этой зоне с водой в качестве катода для случая тлеющего разряда атмосферного давления [15].

В работе [6] предложена схема активируемых разрядом реакций, предполагающая разделение объема раствора на две зоны. В первичной зоне с толщиной, оцениваемой авторами примерно в 10 \AA , происходит генерация первичных активных частиц. Первичные активные частицы и такие продукты их взаимодействия, как пероксид водорода и водород, будут диффундировать вне первичной зоны. Эта диффузия в глубь раствора рассматривается как вторичная зона реакции, в которой радикалы могут взаимодействовать с другими радикалами или удаляться в глубь раствора.

Схематично это можно представить следующим образом:



Радикалы и другие продукты диффундируют в толщу электролита и реагируют между собой или с другими частицами в нижнем слое раствора. Катодное падение потенциала при этих условиях не менее 500 В. Полагая в качестве оценки сверху энергию бомбардирующих поверхность раствора ионов равной 500 эВ и используя данные для пробега в воде протонов [16], получаем максимальную толщину слоя воды, в котором происходит рассеяние энергии ионов, не превышающую 0,03 мкм. Согласно этим оценкам в случае слаботоочного тлеющего разряда атмосферного давления (ток разряда 20 мА) площадь катодного пятна составляет около 0,1 см². Если использовать значение выхода радикалов OH^* , равное 7, учитывая их гибель только в процессе димеризации с образованием пероксида водорода ($2k = 1,06 \cdot 10^{10} \text{ дм}^3/\text{моль}$) [17], предполагать также, что скорость генерации радикалов постоянна по толщине первичной зоны, их концентрация в этой зоне составит около 10^{-3} моль/л. Тогда эффективное время жизни радикалов в первичной зоне составит всего около 0,2 мкс. Так как коэффициент диффузии радикалов OH^* равен $2,2 \cdot 10^{-5} \text{ см}^2 \cdot \text{с}^{-1}$, диффузионный пробег радикалов не превы-

сит 2 мкм. Последнее означает, что радикалы ОН практически не имеют шансов выйти за пределы первичной зоны активации. Таким образом, окислительные реакции, инициируемые радикалами OH^* , могут протекать практически только в первичной активной зоне, а их скорость будет лимитироваться процессами переноса исходных веществ в область катодного пятна и продуктов взаимодействия из этой области.

Работа выполнена при поддержке Гранта президента РФ № нш -1829.2003.3

ЛИТЕРАТУРА

1. Klemenc A., Heinrich G. Glimmlichtelectrolyse. IX. Über die apolare Knallgasbildung als Folge der Entstehung metastabiler Wassermoleken // Z. Phys. Chem. 1938. Bd. A. 183. S. 217–232.
2. Alfons Klemenc, Robert Eder, Glimmlichtelectrolyse. YI. Das Verhalten der Chlorsäure, Perchlorsäure und deren Alkalisalze // Z. Phys. Chem. 1937. Abt.A. Bd. 179. Heft 1. S. 1.
3. Hickling A., Linacre J.K., Glow discharge electrolysis. Part 2. The anodic oxidation of ferrous sulphate // J.Chem. Soc. 1954. N 2. P. 711–720.
4. Denaro A.R., Hickling A. Glow discharge electrolysis in aqueous solutions // Electrochem. Soc. 1958. 105. N 5. P. 265–270.
5. Hickling A., I.O.M. Bockris and B.E. Conway (Eds) // Modern Aspects of Electrochemistry. V. 6. Butterworth. London. 1971. P. 329.
6. Hickling A., Ingram M.D. Glow-discharge electrolysis (review) // Journ. Electroanalytical Chemistry. 1964. V.8. P. 65–81.
7. Dewhurst H.A., Flag J.F., Watson P.K. Oxidation of aqueous ferrous sulphate by glow discharge // Journ. Electrochem. Soc. 1959. V. 106. N 4. P. 366–367.
8. Denaro A.R., Owens P.A. Glow discharge electrolysis of alkaline ferrocyanide solutions // Electrochim. acta. 1968. V.13, N 2. P.157–166.
9. Chabchoub M., J.-L. Brisset J.-L., Czernichowski A. Gliding arc treatment of aqueous solutions near atmospheric pressure // 12th International Symposium on Plasma Chemistry. Proceedings. ISPC 12.1995. Minneapolis. V. 2. P. 801–806.
10. Mazzocchin G.A., Magno F., Bontempelli G. Glow discharge electrolysis on ammonia in aqueous solution // J. Electroanal. Chem. 1973. V. 45. N 3. P. 471–483.
11. Alfons Klemenc, Hans Kalisch, Glimmlichtelectrolyse. YII. Die Katalitische Reeinflussbarkeit der Elektrodenvorgänge insbesondere durch Chlorwasserstoffsäure // Z. Phys. Chem. 1938. Bd. A 182. S. 91–102.
12. Denaro A.R., Hough K.O. Glow discharge electrolysis of sulfuric acid solutions // Electrochim. acta. 1972. V. 17. N 3. P. 549–559.
13. Denaro A.R., Mitchell A., Richardson M.R. Glow discharge electrolysis of iodide solutions // Electrochem. Acta. 1971. V. 16. N 6. P. 755–763.
14. Шамб У., Семтерфилд Ч., Вентворс Р. Перекись водорода. М., 1958.
15. Кутенов А.М., Захаров А.Г., Максимов А.И. Физико-химические основы вакуумно-плазменной и плазменно-растворной обработки природных и синтетических материалов. М., 2004.
16. Бугаенко Л.Т., Кузьмин М.Г., Полак Л.С. Химия высоких энергий. М., 1988.
17. Пикаев А.К., Кабакчи С.А. Реакционная способность первичных продуктов радиолиза воды. М., 1982.

Поступила 06.05.04

Summary

In the present work a study of oxidation of $\text{K}_4[\text{Fe}(\text{CN})_6]$ to $\text{K}_3[\text{Fe}(\text{CN})_6]$ under the treatment of positive glow discharge of atmospheric pressure was carried out. The dependence of the $\text{K}_3[\text{Fe}(\text{CN})_6]$ oxidation kinetics on its initial concentration and on the discharge current was studied as well as the influence of KCl addition as the catalyst of hydrogen peroxide decomposition and that of several alcohols as OH^* -radicals acceptors. Initial rates of $\text{K}_3[\text{Fe}(\text{CN})_6]$ oxidation and yield-to-current values were obtained for different discharge currents. Oxidation reactions, initiated by OH^* -radicals, were shown to take place in primary active zone of discharge only, and their rates would be limited by the transport of initial substances into the area of cathode spot and of interaction products out of it.

СЕДИМЕНТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНЫХ ГИДРОКСИДОВ АЛЮМИНИЯ И ЖЕЛЕЗА

*Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины,
пр. Октябрьский, 43-А, г. Николаев, 54018, Украина*

Введение. Сточные воды гальванических цехов содержат в своем составе ядовитые вещества (цианиды, медь, хром, кадмий, никель, цинк), концентрация которых в десятки тысяч раз превосходит предельно допустимые (ПДК). Для ионов тяжелых металлов, содержащихся в гальванических стоках (ГС), не существует механизмов естественного самоочищения, в связи с чем они особенно опасны для окружающей среды. Поэтому проблеме очистки гальванических стоков во всех развитых странах уделяется особое внимание, так как от ее качества зависит экологическая безопасность окружающей среды.

Традиционной технологией, практически повсеместно применяемой для очистки гальванических стоков, является реагентная. По этой технологии из гальванических стоков не удается удалить больше 90% солей тяжелых металлов. Практически 100% очистка гальваностоков от ионов CrO_4^{2-} , Ni^{2+} , Cd^{2+} , Zn^{2+} достигнута применением электрокоагуляторов [1]. Но при этом способе очистки чрезвычайно велик расход электроэнергии.

Радикальное изменение процесса очистки ГС может быть достигнуто при комплексном воздействии на обрабатываемую жидкость ряда факторов. В [2, 3] рассмотрены результаты экспериментальных исследований очистки хромсодержащих гальваностоков в электроразрядных реакторах с металлической загрузкой.

Данная работа является продолжением исследований.

С целью интенсификации процесса очистки гальваностоков с использованием электроразрядных коагулянтов изучено влияние различных типов реакторов на свойства получаемых гидроксидов металлов (алюминия и железа), а также природы и концентрации солей, содержащихся в гальваностоках, на седиментационные характеристики гидроксидов.

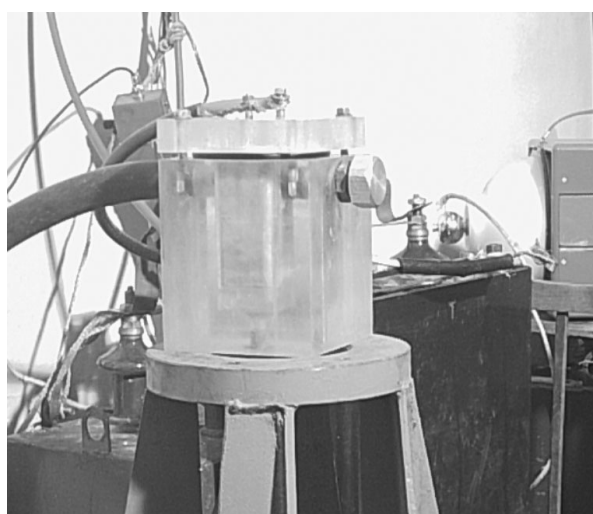


Рис. 1. Реактор электроэрозионного диспергирования № 1

Электроразрядные гидроксиды алюминия и железа получали в трех различных камерах-реакторах: для реактора № 1 (рис. 1) длина камеры составляла $5,6 \cdot 10^{-2}$ м, ширина слоя загрузки b варьировала от $1,2 \cdot 10^{-2}$ до $5,8 \cdot 10^{-2}$ м, высота загрузки h – от $0,7 \cdot 10^{-2}$ до $4,0 \cdot 10^{-2}$ м, индуктивность L – от $1,1 \cdot 10^{-6}$ до $2,8 \cdot 10^{-6}$ Гн, напряжение U – от $2,1 \cdot 10^3$ до $7,1 \cdot 10^3$ В, емкость C – от $0,25 \cdot 10^{-6}$ до $2,7 \cdot 10^{-6}$ Ф; для реактора № 2 (рис. 2) длина камеры варьировала от $1,5 \cdot 10^{-1}$ до $5,0 \cdot 10^{-1}$ м, ширина слоя загрузки b составляла $1,5 \cdot 10^{-2}$ м, высота загрузки h варьировала от $1,3 \cdot 10^{-2}$ до $2,5 \cdot 10^{-2}$ м, индуктивность L – от $1,2 \cdot 10^{-6}$ до $1,5 \cdot 10^{-6}$ Гн, напряжение U – от $4,5 \cdot 10^3$ до $12,5 \cdot 10^3$ В, емкость C – от $0,25 \cdot 10^{-6}$ до $1,35 \cdot 10^{-6}$ Ф; для реактора № 3 (рис. 3) длина камеры варьировала от $5,5 \cdot 10^{-2}$ до $8,0 \cdot 10^{-2}$ м, высота загрузки h – от $1,0 \cdot 10^{-2}$ до $2,0 \cdot 10^{-2}$ м, индуктивность L – от $1,2 \cdot 10^{-6}$ до $2,0 \cdot 10^{-6}$ Гн, напряжение U – от $3,5 \cdot 10^3$ до $9,2 \cdot 10^3$ В, емкость C составляла $1,35 \cdot 10^{-6}$ Ф.

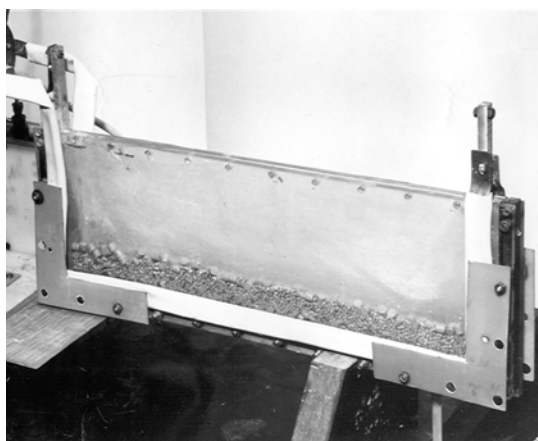


Рис. 2. Реактор электроэрозионного диспергирования № 2

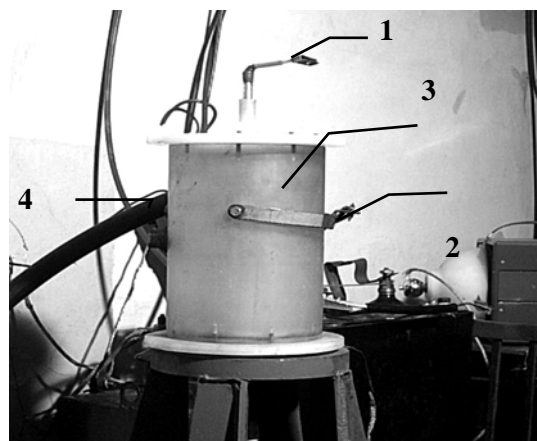


Рис. 3. Реактор электроэрозионного диспергирования № 3. 1 – высоковольтный анод; 2 – анод объемной электроискровой обработки; 3 – диэлектрические крышка и корпус; 4 – система прокачки рабочей жидкости

Исследования влияния характеристик электроразрядных реакторов на увеличение выхода гидроксидов различных металлов в электроразрядных процессах его получения проводились в каждом из реакторов по разным параметрам.

Реактор № 1 предназначался для исследования зависимостей от высоты и ширины слоя загрузки, реактор № 2 – от высоты и длины, реактор № 3 – от геометрических свойств камеры и высоты слоя жидкости над загрузкой.

В табл.1 представлены режимы получения электроразрядного гидроксида алюминия в водопроводной воде.

Таблица 1. Режимы получения электроразрядного гидроксида алюминия

№ образца	Напряжение, 10^3 В	Емкость, 10^{-6} Ф	Количество импульсов	Разрядный промежуток, 10^{-3} м	Тип разрядной камеры	Толщина слоя загрузки, 10^{-3} м	Размер частиц загрузки, 10^{-3} м	Индуктивность, 10^{-6} Гн	Масса загрузки, 10^{-3} кг
1	4,5	1,35	1000	55	Реактор 1	8	4	2,0	210
2	Режим обработки, как в 1 + 100 импульсов с $U = 20000$ В и $C = 0,25 \cdot 10^{-6}$ Ф								
3	5	1,35	5000	500	Реактор 2	18	4	1,5	200
4	4,5	1,35	10000	55	Реактор 3	12	4	1,2	330
5	3,7	1,35	10000	50	Реактор 1	15	2,5	1,1	66
6*	4,5	1,35	10000	55	Реактор 3	12	4	1,5	330

* Электроэрозионная обработка проводилась в сточной воде, остальные образцы получены при разряде в водопроводной воде.

По данным седиментационного анализа рассчитаны радиусы образовавшихся частиц гидроксида алюминия (табл. 2) в соответствии с методикой, приведенной в [4]. Вычисления проводили, используя зависимость

$$r = \sqrt{\frac{9\eta u}{2(\rho - \rho_0) \cdot g}}, \quad (1)$$

где r – радиус частицы, м; η – вязкость жидкости, Па·с; u – скорость седиментации частиц, м/с; ρ – плотность вещества частицы, кг/м³; ρ_0 – плотность среды, кг/м³; g – ускорение свободного падения, м/с².

Исследования по кинетике осаждения гидроксидов выполняли визуальным и фотометрическим методами. Измерения проводили сразу же после электроразрядного получения гидроксида.

Таблица 2. Результаты седиментационного анализа

№ образца	1	2	3	4	5	6
Радиус частиц, мкм	20,3	21,5	21,7	24,6	20,1	40,6

Как следует из таблиц, размер частиц электроразрядного гидроксида алюминия в основном определяется энергией в импульсе и мало зависит от количества импульсов, геометрической формы разрядной камеры, массы и толщины слоя загрузки.

Увеличение размера частиц электроразрядного гидроксида алюминия при его получении в сточной воде обусловлено, по-видимому, участием ионов растворенных солей в формировании частиц гидроксида. Аналогичное влияние концентрации электролита NaCl на максимальный размер агрегатов в коллоидном растворе Al(OH)₃ описано в [4]. С увеличением концентрации электролита размер хлопьев коагулянта сначала, как правило, возрастает, а затем уменьшается.

Результаты исследований влияния солей металлов на седиментационные характеристики и размер частиц электроразрядного гидроксида алюминия представлены в табл. 3. Опыты проводили в водных растворах солей сульфатов меди и цинка, моделирующих содержание сточных вод.

Добавление солей металлов в рабочую среду при получении электроразрядного гидроксида алюминия увеличивает примерно от 2 до 3 раз размер его частиц по сравнению с чистой водной средой (см. табл. 2). Причем в случае сульфатов меди и цинка природа катиона соли оказывает относительно слабое влияние на метрические характеристики частиц гидроксидов.

Большая концентрация соли, как это отмечалось ранее на примере хлорида натрия, сначала увеличивает агрегаты частиц, а затем приводит к уменьшению их размера. Эта тенденция наблюдается и для сульфата цинка.

Таблица 3. Режимы получения и результаты седиментационного анализа электроразрядного гидроксида алюминия, выработанного в разрядной камере РЭД2, в растворах солей

№ образца	Напряжение, 10 ³ В	Емкость, 10 ⁻⁶ Ф	Количество импульсов	Разрядный промежуток, м	Толщина слоя загрузки, 10 ⁻³ м	Размер частиц загрузки, 10 ⁻³ м	Исходная концентрация, 10 ⁻³ кг/м ³	Масса загрузки, кг	Радиус частиц сразу после обработки, 10 ⁻⁶ м	Радиус частиц через 2 часа, 10 ⁻⁶ м	Радиус частиц через сутки, 10 ⁻⁶ м
Сульфат меди (гидроксид алюминия)											
1	8,2	0,25	30000	0,5	30	3	1000	0,3	39,43	39,27	38,43
Сульфат цинка (гидроксид алюминия)											
2	7,7	0,25	10000	0,5	30	3	300	0,3	91,40	89,77	–
3	7,7	0,25	20000	0,5	30	3	1000	0,3	54,93	–	76,26

Сохранение размеров частиц через сутки после получения гидроксида свидетельствует о медленных процессах кристаллизации, что согласуется с данными других исследователей (кристаллизация обнаруживается только в промежутке времени от 4 до 5 недель после образования гидроксида, полученного химическим методом в растворе сульфата алюминия) [5].

Аналогичные исследования проведены для электроразрядного гидроксида железа.

В табл. 4 представлены результаты экспериментальных исследований по получению электроразрядного гидроксида железа в растворах солей металлов в воде. Согласно данным под-

тверждается влияние солей металлов в рабочей среде на размеры образующихся хлопьев аморфного гидроксида железа. Причем сохраняются те же закономерности, что и для электроразрядного гидроксида алюминия, – добавление соли вначале увеличивает размер частиц гидроксида, а затем при последующем увеличении концентрации растворенной соли происходит уменьшение размера образующих частиц.

Сравнивая результаты исследований по гидроксидам алюминия и железа, нетрудно заметить, что для последнего размеры образующихся частиц в некоторых случаях от 2 до 4 раз превышают аналогичные значения для гидроксида алюминия.

Таблица 4. Режимы получения и результаты седиментационного анализа электроразрядного гидроксида железа в растворах солей

№ образ-ца	Напря-жение, 10^3 В	Коли-чество импуль-сов	Раз-ряд-ный про-межу-ток, 10^{-3} м	Тол-щина слоя загрузки, 10^{-3} м	Размер частиц за-грузки, 10^{-3} м	Исход-ная кон-центра-ция, 10^{-3} кг/м ³	Масса за-грузки, кг	Радиус частиц сразу после обра-ботки, 10^{-6} м	Радиус частиц через 2 часа, 10^{-6} м	Радиус частиц через сут-ки, 10^{-6} м
Вода (железная металлозагрузка)										
1	13,2	4000	500	10	3	–	0,7	14,70	–	220,00
Сульфат меди (железная металлозагрузка)										
2	13,2	4000	500	10	3	300	0,7	71,11	268,00	248,50
3	13,2	12000	500	10	3	1000	0,7	156,00	152,00	162,00
Сульфат цинка (железная металлозагрузка)										
4	13,2	3200	500	10	3	300	0,7	331,49	320,65	311,79
5	13,2	10000	500	10	3	1000	0,7	78,69		70,34
6	13,2	30000	500	10	3	3000	0,7	38,63	41,68	41,68
Калий двуххромовокислый (железная металлозагрузка)										
7	13,6	4000	500	10	3	300	0,7	252,2	283,8	–
8	13,6	8000	500	10	3	300	0,7	255,5	259,5	–
Модельный сток (аналог реального)										
9	12,5	24000	500	20	4	1000	0,8	161,8	161,8	–
Реальный сток, разведенный трижды										
10	10,0	45000	500	20	4	3000	0,8	108,9	101,1	–

Это связано с тем, что ориентация и плотность упаковки частиц в коагуляционных структурах могут быть неодинаковыми в разных участках. Как показано в [6], для солей гидроксида железа имеются, по крайней мере, две группы частиц, отличающихся по механическим свойствам. Это явление связано, вероятно, со способностью анизодиаметрических частиц гидроксида железа к построению тактоидов – агрегатов с ясно выраженной периодичностью расположения первичных частиц.

Таким образом, исследования показывают, что свойства электроразрядных гидроксидов алюминия и железа зависят не только от энергетических параметров их получения, но и от состава водной среды. Это следует учитывать в тех технологических процессах, где предусмотрено совмещение стадий получения электроразрядного коагулянта и одновременной очистки гальваностокков.

ЛИТЕРАТУРА

1. Назарян М.М., Ефимов В.Т. Электрокоагуляторы для очистки промышленных стоков. Харьков, 1983.
2. Зубенко А.А., Юцишина А.Н. Исследование свойств электроразрядного гидроксида алюминия // Электронная обработка материалов. 2001. № 6. С. 60–65.
3. Зубенко А.А., Юцишина А.Н. Очистка хромсодержащих стоков в электроразрядных реакторах с металлической загрузкой // Там же. 2002. № 4. С. 77–79.
4. Воюцкий С.С. Курс коллоидной химии. М., 1975.
5. Бабенков Д.Е. Очистка воды коагулянтами. М., 1977.
6. Ефремов И.Ф. Периодические коллоидные структуры. Л., 1971.

Summary

The properties of electrical discharge aluminium hydroxide and iron hydroxide have been investigated. On the basis of sedimentation technique the particle size of these materials was calculated. It was shown that the radius of particles depends on conditions of obtaining of the coagulants. Thus, the presence of copper, chromium and zinc salts in water solution results in increasing of the radii particles of the materials. Besides, the sedimentation behavior of the coagulants is also changed. Obtained facts have to be taken into account at the development of the processes of purification of galvanic pollution by the electric discharge coagulant method.

Ф.П. Гросу

ЕСТЕСТВЕННАЯ КОНВЕКЦИЯ ЗАРЯЖЕННОГО ВЛАЖНОГО ВОЗДУХА В НАКЛОННОМ ПЛОСКОМ КОНДЕНСАТОРЕ

*Институт прикладной физики АН РМ,
ул. Академией, 5, г. Кишинев, MD-2028, Республика Молдова
Государственный аграрный университет Молдовы,
ул. Мирчеица, г. Кишинев, MD-2049, Республика Молдова*

Рассмотрим конвективное движение влажного, электрически заряженного воздуха между пластинами плоскопараллельного конденсатора, поддерживаемыми при заданных разностях температур, влажностей и электрических потенциалов соответственно:

$$\Theta_s = T_1 - T_2; \quad r_s = s_1 - s_2; \quad \Phi_s = \Phi_1 - \Phi_2. \quad (1)$$

Такая задача может иметь непосредственное отношение к установке, предназначенной для получения влажного воздуха применительно, например, к электрогазодинамическому (ЭГД) ветровому генератору [1], а также к другим приложениям электрогидродинамики [2].

ЭГД-процессы, происходящие в условиях рис. 1, в общем случае описываются следующей системой уравнений:

$$\begin{aligned} \gamma \left[\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \nabla) \vec{v} \right] &= -\nabla p + \gamma \vec{g} + \rho \vec{E} + \eta \nabla^2 \vec{v}; \quad \nabla \vec{v} = 0; \\ \frac{\partial T}{\partial t} + \vec{v} \nabla T &= a \nabla^2 T; \quad \gamma \left(\frac{\partial s}{\partial t} + \vec{v} \nabla s \right) = \nabla (\gamma D \nabla s), \quad s \equiv \gamma_n / \gamma; \\ \vec{j} &= \sigma \vec{E} + \rho \vec{v}; \quad \rho = \nabla (\epsilon \vec{E}); \quad \nabla \vec{j} = 0; \quad \vec{E} = -\nabla \Phi, \end{aligned} \quad (2)$$

где γ_n – плотность пара, s – удельное влагосодержание воздуха, удовлетворяющее четвертому уравнению (2). В уравнение Навье–Стокса, помимо гравитационной силы $\gamma \vec{g}$, для общности включена и кулоновская сила $\rho \vec{E}$. Однако в данной работе этой силой будем пренебрегать, ограничиваясь тем самым приближением “естественности” конвекции, когда движение обусловливается только архимедовыми силами и поле на движение воздуха не влияет, в то время как обратное влияние движения среды на распределения электрических характеристик имеет место, и оно осуществляется посредством конвективного электрического тока ($\vec{j}_k \equiv \rho \vec{v}$) и зависимости электрофизических параметров ϵ и σ от температуры и влажности.

Summary

The properties of electrical discharge aluminium hydroxide and iron hydroxide have been investigated. On the basis of sedimentation technique the particle size of these materials was calculated. It was shown that the radius of particles depends on conditions of obtaining of the coagulants. Thus, the presence of copper, chromium and zinc salts in water solution results in increasing of the radii particles of the materials. Besides, the sedimentation behavior of the coagulants is also changed. Obtained facts have to be taken into account at the development of the processes of purification of galvanic pollution by the electric discharge coagulant method.

Ф.П. Гросу

ЕСТЕСТВЕННАЯ КОНВЕКЦИЯ ЗАРЯЖЕННОГО ВЛАЖНОГО ВОЗДУХА В НАКЛОННОМ ПЛОСКОМ КОНДЕНСАТОРЕ

*Институт прикладной физики АН РМ,
ул. Академией, 5, г. Кишинев, MD-2028, Республика Молдова
Государственный аграрный университет Молдовы,
ул. Мирчеица, г. Кишинев, MD-2049, Республика Молдова*

Рассмотрим конвективное движение влажного, электрически заряженного воздуха между пластинами плоскопараллельного конденсатора, поддерживаемыми при заданных разностях температур, влажностей и электрических потенциалов соответственно:

$$\Theta_s = T_1 - T_2; \quad r_s = s_1 - s_2; \quad \Phi_s = \Phi_1 - \Phi_2. \quad (1)$$

Такая задача может иметь непосредственное отношение к установке, предназначенной для получения влажного воздуха применительно, например, к электрогазодинамическому (ЭГД) ветровому генератору [1], а также к другим приложениям электрогидродинамики [2].

ЭГД-процессы, происходящие в условиях рис. 1, в общем случае описываются следующей системой уравнений:

$$\begin{aligned} \gamma \left[\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \nabla) \vec{v} \right] &= -\nabla p + \gamma \vec{g} + \rho \vec{E} + \eta \nabla^2 \vec{v}; \quad \nabla \vec{v} = 0; \\ \frac{\partial T}{\partial t} + \vec{v} \nabla T &= a \nabla^2 T; \quad \gamma \left(\frac{\partial s}{\partial t} + \vec{v} \nabla s \right) = \nabla (\gamma D \nabla s), \quad s \equiv \gamma_n / \gamma; \\ \vec{j} &= \sigma \vec{E} + \rho \vec{v}; \quad \rho = \nabla (\epsilon \vec{E}); \quad \nabla \vec{j} = 0; \quad \vec{E} = -\nabla \Phi, \end{aligned} \quad (2)$$

где γ_n – плотность пара, s – удельное влагосодержание воздуха, удовлетворяющее четвертому уравнению (2). В уравнение Навье–Стокса, помимо гравитационной силы $\gamma \vec{g}$, для общности включена и кулоновская сила $\rho \vec{E}$. Однако в данной работе этой силой будем пренебрегать, ограничиваясь тем самым приближением “естественности” конвекции, когда движение обусловливается только архимедовыми силами и поле на движение воздуха не влияет, в то время как обратное влияние движения среды на распределения электрических характеристик имеет место, и оно осуществляется посредством конвективного электрического тока ($\vec{j}_k \equiv \rho \vec{v}$) и зависимости электрофизических параметров ϵ и σ от температуры и влажности.

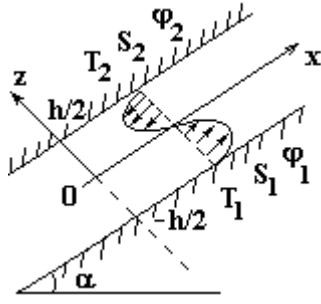


Рис. 1

В такой постановке первые четыре уравнения системы (2) образуют замкнутую систему уравнений естественной конвекции влажного воздуха без электрического фактора. Оставшиеся уравнения также образуют замкнутую систему, в которой скорость $\vec{v}(z)$ предполагается известной из решения предыдущей системы.

Полагая конденсатор бесконечной протяженности, будем интересоваться стационарным $\left(\frac{\partial}{\partial t} = 0\right)$ и одномерным движением воздуха, когда $\vec{v} = \vec{i}v_x \equiv \vec{i}v(z)$, $(\vec{v}\nabla)\vec{v} \equiv 0$. Кроме того, будем считать $T_1 = \text{const} > T_2 = \text{const}$, $s_1 = \text{const} > s_2 = \text{const}$, обосновывая тем самым предположение о зависимости этих функций только от поперечной координаты z , что приводит к еще более значительному упрощению задачи ввиду исчезновения конвективных слагаемых: $\vec{v}\nabla T \equiv 0$; $\vec{v}\nabla s \equiv 0$. Положив далее

$$p' \equiv p - p_0; \quad \gamma' \equiv \gamma - \gamma_0; \quad T' \equiv T - T_0; \quad s' \equiv s - s_0,$$

где величины, отмеченные индексом "0", – равновесные (при $v=0$), для гидродинамической части задачи из (2) найдем

$$-\nabla p' + \gamma' \vec{g} + \eta \nabla^2 \vec{v} = 0; \quad \nabla^2 T' = 0; \quad \nabla^2 s' = 0, \quad (3)$$

где учтено уравнение равновесия

$$-\nabla p_0 + \gamma_0 \vec{g} = 0,$$

из которого следует

$$\text{rot}(\gamma_0 \vec{g}) \equiv \nabla \gamma_0 \times \vec{g} = 0.$$

Но согласно рис. 1 $\nabla \gamma_0 \times \vec{g} = 0$, последнее равенство возможно лишь при $\gamma_0 = \text{const}$, следовательно, $T_0 = \text{const}$, $s_0 = \text{const}$. Приняв эти константы равными их средним по сечению слоя значениям:

$$T_0 \equiv \frac{T_1 + T_2}{2}; \quad s_0 \equiv \frac{s_1 + s_2}{2} \quad (4)$$

и обозначив для удобства

$$\theta \equiv T' = T - T_0; \quad r \equiv s' = s - s_0, \quad (5)$$

из (3) найдем

$$\begin{aligned} -\frac{\partial p'}{\partial x} + \gamma g (\beta \theta + \beta_s r) \sin \alpha + \eta \frac{d^2 v}{dz^2} &= 0; \\ -\frac{\partial p'}{\partial z} + \gamma g (\beta \theta + \beta_s r) \cos \alpha &= 0; \\ \frac{d^2 \theta}{dz^2} = 0; \quad \frac{d^2 r}{dz^2} &= 0; \end{aligned} \quad (6)$$

причем воспользуемся линейным приближением разложения γ' в ряд по степени θ и r :

$$\gamma' \cong -\gamma_0 \beta \theta - \gamma_0 \beta_s r \quad (7)$$

и введем обозначения для температурного и влажностного коэффициентов плотности соответственно:

$$\beta \equiv -\frac{1}{\gamma_0} \left(\frac{\partial \gamma}{\partial T} \right); \quad \beta_s \equiv -\frac{1}{\gamma_0} \left(\frac{\partial \gamma}{\partial s} \right)_0, \quad (8)$$

где знаки “–” отвечают известным фактам уменьшения плотности с ростом температуры и влажности воздуха, так что $\beta > 0$; $\beta_s > 0$. Кроме того, в (6) опущены для краткости индексы “0” при γ_0 .

Наконец, к системе (6) необходимо привести еще граничные условия (рис.1):

$$v\left(\pm \frac{h}{2}\right) = 0; \quad T\left(\pm \frac{h}{2}\right) = T_{2,1}; \quad s\left(\pm \frac{h}{2}\right) = s_{2,1} \quad (9)$$

или с учетом (1), (4) и (5):

$$\theta\left(\pm \frac{h}{2}\right) = \mp \frac{\theta_s}{2}; \quad r\left(\pm \frac{h}{2}\right) = \mp \frac{r_s}{2}. \quad (10)$$

При условиях (9), (10) последние два уравнения системы (6) имеют простые решения:

$$\theta(z) = -\frac{\theta_s}{h} z; \quad r(z) = -\frac{r_s}{h} z, \quad (11)$$

показывающие, что перенос тепла и влаги осуществляется посредством молекулярного механизма (теплопроводностью и диффузией).

Интегрируя второе уравнение системы (6), находим избыточное давление

$$p'(x, z) = -\gamma g \cos \alpha (\beta \theta_s + \beta_s r_s) \frac{z^2}{2h} + F(x), \quad (12)$$

где $F(x)$ – произвольная функция.

Подставив (11) и (12) в первое уравнение (6) и интегрируя, находим скорость:

$$v(z) = \frac{g(\beta \theta_s + \beta_s r_s) \sin \alpha}{6\nu h} \cdot z^3 - \frac{Bz^2}{2} + c_1 z + c_2 \quad (13)$$

где ν – кинематическая вязкость среды; c_1, c_2 – постоянные интегрирования, подлежащие нахождению. Далее,

$$B \equiv -\frac{dF}{dx} = \text{const}, \quad (14)$$

причем постоянство этой величины непосредственно вытекает из (13).

Подставив в (13) $z = \pm h/2$ с учетом граничных условий для скорости (9), найдем постоянные интегрирования c_1 и c_2 , а затем и саму скорость:

$$v(\xi) = \frac{h^2}{8} (B - K \cdot \xi) (1 - 4\xi^2), \quad (15)$$

где

$$\xi \equiv \frac{z}{h}; \quad K \equiv \frac{g(\beta \theta_s + \beta_s r_s) \sin \alpha}{3\nu}; \quad \xi \in \left[-\frac{1}{2}; \frac{1}{2}\right]. \quad (16)$$

Интегрируя (15) по поперечному сечению канала ($dy \cdot dz$), находим расход воздуха:

$$G = \epsilon \int_{-h/2}^{h/2} v(z) dz = \frac{\epsilon B h^3}{12}, \quad (17)$$

где ϵ – ширина канала.

Если канал на торцах (концах) закрыт, то есть $G = 0$, то и $B = 0$ и, следовательно, профиль скорости представляет собой антисимметричную кубическую параболу (см. рис. 1):

$$v(\xi) = -\frac{h^2}{8} K \xi (1 - 4\xi^2), \quad (18)$$

так, что вдоль нижней пластины ($\xi < 0$) воздух подымается ($v > 0$), а вдоль верхней – опускается.

При $\alpha = 90^\circ$ (и $\beta_s = 0$) (18) переходит в известное решение задачи об естественной конвекции жидкости (газа) между двумя плоскопараллельными вертикальными стенками, нагретыми до постоянных, но разных температур [3].

В случае $\alpha = 0$ имеем классическую задачу Рэлея о естественной конвекции между двумя плоскопараллельными горизонтальными пластинами, нижняя из которых более горячая [4]. При этом

конвекция возникает не сразу, а после достижения некоторой критической разности температур, определяемой критическим значением числа Рэлея:

$$R_a \equiv \frac{Bg\theta_s h^3}{\nu a} \geq R_{\text{акр}} \cong 1708,$$

причем конвекция имеет ячеистую структуру (ячейки Бенара).

Если канал на концах открыт, то возможно течение с отличным от нуля расходом ($G \neq 0$) и согласно (17) постоянная B равна градиенту давления со знаком “-”:

$$B = -\frac{dp'}{dx} \neq 0$$

и течение с $G \neq 0$ должно происходить в направлении убывания давления p' и

$$B = -\frac{dp'}{dx} = \frac{\Delta p}{l}, \quad (19)$$

где Δp – перепад давления, который можно определить по состояниям воздуха на входе и выходе из канала. Профиль скорости будет определяться формулой (15), согласно которой на нечетный профиль с противоположным знаком будет накладываться четный, квадратичный, обуславливающий $G \neq 0$.

Оценим величину максимальной скорости конвекции в случае антисимметричного течения воздуха, которая достигается при $\xi = \pm 1/2\sqrt{3}$ и равна по величине

$$v_{\text{max}} = \frac{h^2 K}{24\sqrt{3}}.$$

Пренебрегая влажностной составляющей ($\beta_s = 0$) скорости и приняв $\beta \approx 1/273^\circ\text{C}$, $\theta_s = 5^\circ\text{C}$, $\alpha = 10^0$; $\nu = 1,5 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$, $h = 0,5 \text{ м}$, находим

$$v_{\text{max}} = \frac{0,5^2 \cdot 9,8 \cdot 5 \cdot \sin 10^0}{273 \cdot 24 \cdot \sqrt{3} \cdot 3 \cdot 1,5 \cdot 10^{-5}} \frac{\text{м}}{\text{с}} \approx 0,42 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Увеличив расстояние h вдвое, угол наклона до 30^0 и перепад температур вдвое, получим $v_{\text{max}} \approx 10 \text{ м/с}$. Следовательно, скорость конвекции может достигнуть весьма внушительных значений.

Кстати, отметим, что описываемая конвекция может наблюдаться в естественных условиях на склонах холмов и гор, освещенных солнцем, особенно в летний период при сильном нагреве почвы.

Что касается электрической части задачи, определяемой последними четырьмя уравнениями системы, заметим, что в предположении постоянства электрофизических параметров ε и σ указанные уравнения (без последнего) допускают аналитическое решение для плотности заряда:

$$\rho(x, z) = \rho_0(z) \cdot e^{-\frac{x}{\tau v(z)}}, \quad (20)$$

где $\tau \equiv \varepsilon/\sigma$ – время электрической релаксации среды; $\rho_0(z)$ – функция, подлежащая нахождению по начальным ($x=0$) условиям.

В случае $G = 0$, то есть $v(-z) = -v(z)$ (рис.1), формулу (20) можно представить в виде

$$\rho(x, z) = \begin{cases} \rho_0(z) \cdot e^{-\frac{x}{\tau |v(z)|}}, & z \in \left(-\frac{h}{2}; 0\right); \\ \rho_0(z) \cdot e^{\frac{x}{\tau |v(z)|}}, & z \in \left(0; \frac{h}{2}\right). \end{cases} \quad (21)$$

Плотность электрического тока конвекции, вырабатываемого ЭГД-каналом в генераторном режиме, определяется этими выражениями, доумноженными на скорость v :

$$j_k = \begin{cases} \rho_0 |\nu| \cdot e^{-\frac{x}{\tau|\nu|}}, & z \in \left(-\frac{h}{2}; 0\right), \\ -\rho_0 |\nu| \cdot e^{\frac{x}{\tau|\nu|}}, & z \in \left(0; \frac{h}{2}\right). \end{cases} \quad (22)$$

Как следует из этих выражений, в верхнем полуслое ток течет вниз (при $\rho_0 > 0$), будучи по абсолютной величине значительно больше, чем в нижнем. Минимальные значения плотностей тока по нижней из приведенных формул (21) $\rho_0 \sim 10^{-4}$ Кл/м³ (плотности, характерные для коронного разряда) $\nu \sim 10$ м/с согласно (22) для минимальной плотности находим оценку $j_{k \min} \sim 10^{-3}$ А/м² = 0,1 мкА/см², что в условиях высокого напряжения, выработанного ЭГД-генераторами, весьма приемлемо [5].

Таким образом, имеются предпосылки полагать, что одномерная естественная конвекция влажного электрически заряженного воздуха может быть использована в целях ЭГД-генерирования электрической энергии. При этом роль влажности будет сводиться к уменьшению подвижностей воздушных ионов за счет захвата ими дипольных молекул паров воды, а также к усилению архимедовых сил. Другие аспекты рассматриваемой задачи связаны, как уже отмечалось, с решением других уравнений электродинамики.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Болога М.К., Гросу Ф.П., Кожухарь И.А.* К расчету ветрового электрогазодинамического генератора // *Электронная обработка материалов.* 2003. № 4. С. 37–40.
2. *Остроумов Г.А.* Взаимодействие электрических и гидродинамических полей. М., 1979.
3. *Остроумов Г.А.* Свободная конвекция в условиях внутренней задачи. М.: Л., 1952.
4. *Герциупи Г.З., Жуховицкий Е.М.* Конвективная устойчивость несжимаемой жидкости. М., 1972.
5. *Рубашов И.Б., Бортников Ю.С.* Электрогазодинамика. М., 1971.

Поступила 14.01.05

Summary

One-dimensional steady convection of humid electrically charged air in the gap of the inclined plane capacitor, arising due to buoyancy forces as a result of both temperature and humidity non-uniformities, is considered. It is shown that this flow can be used for electric current generation by EHD method.

ПРОКАЧКА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЖИДКОСТИ В КОАКСИАЛЬНЫХ ТРУБАХ

*Институт прикладной физики АН РМ,
ул. Академией, 5, г. Кишинев, MD-2028, Республика Молдова*

Известны различные конструкции ЭГД-насосов [1–4], причем особенности каждой из них продиктованы условиями применения насоса – электрофизическими свойствами прокачиваемой среды, обеспечением режимных параметров, например малых расходов и больших напоров, а также геометрией устройства, в которое встроены насос. В данной работе приведены результаты исследования характеристик ЭГД-насоса с кольцеобразными электродами (рис. 1), являющегося модификацией трехэлектродной системы [3].

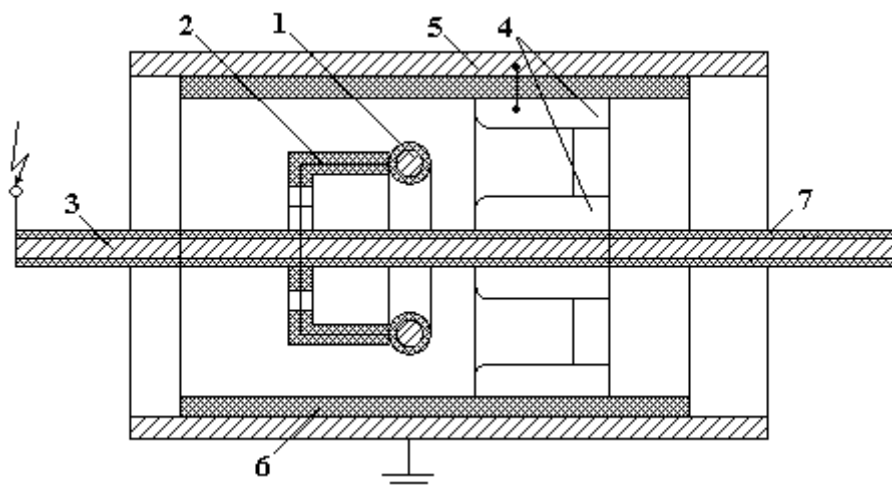


Рис. 1. Схема электрогидродинамического насоса

Эмиттер 1 представляет собой электропроводящее кольцо с перфорированным изоляционным покрытием, укрепленное на оправе 2 и соединенное с соосным высоковольтным электродом 3. Коллектор 4, выполненный в виде кольцевого зазора, имеет электрический контакт с трубкой 5. При этом эмиттер электроизолирован трубкой 6 от трубки 5, а коллектор – от высоковольтной проволоки 3 трубкой 7. В качестве изоляционного материала использовался фторопласт. ЭГД-насос устанавливался в кольцевом зазоре между трубкой и высоковольтным электродом 3.

Измерение напорно-расходной характеристики проводилось с использованием емкости, в которую помещался насос. Выходной патрубок насоса соединялся с измерительной ячейкой. По времени заполнения ячейки и ее объему рассчитывался объемный расход рабочего вещества. Одновременно регистрировалась разность уровней рабочего вещества в пьезометре, соединенном с выходом насоса и сосуда. По высоте столба и плотности жидкости определялась напорная характеристика насоса. Гидродинамической составляющей напора пренебрегали ввиду малой скорости прокачки по сравнению с гидростатической.

В качестве рабочих жидкостей использовались фреон-113, смесь фреон-113 – ацетон (~1%), керосин и трансформаторное масло.

На рис. 2–6 представлены напорные и расходные характеристики ЭГД-насоса в зависимости от подаваемой разности потенциалов φ . С увеличением потенциала φ растет высота столба H исследуемой жидкости.

дуемой жидкости в пьезометре (рис. 2), что свидетельствует об увеличении напорной характеристики насоса. С ростом разности потенциалов φ между электродами возрастает плотность объемных зарядов в рабочей среде и, как следствие, улучшаются характеристики насоса.

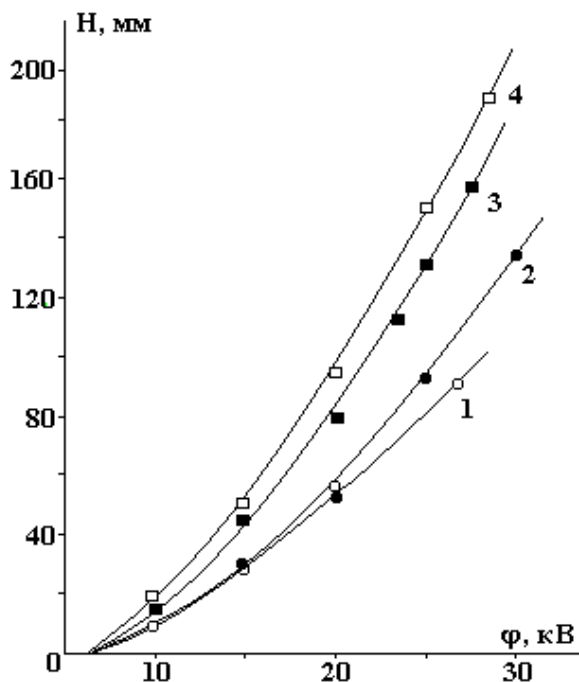


Рис. 2. Зависимость напора, создаваемого ЭГД-насосом, от разности потенциалов на электродах. 1 – фреон-113; 2 – фреон-113-ацетон (~ 1%); 3 – керосин; 4 – трансформаторное масло, $\nu = 0$

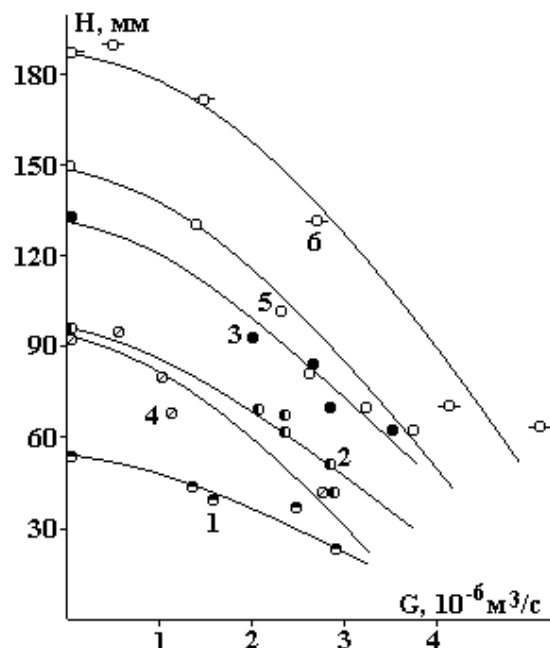


Рис. 3. Напорно-расходная характеристика. 1–3 – фреон-113-ацетон (~ 1%); 4–6 – керосин. φ , кВ: 1, 4 – 20; 2, 5 – 25; 3, 6 – 28

Наблюдается снижение напора H с повышением расхода G (рис. 3). С изменением аргумента $\varepsilon\varphi^2$ в сторону больших значений давление (напор) P практически увеличивается по линейному закону (рис. 4).

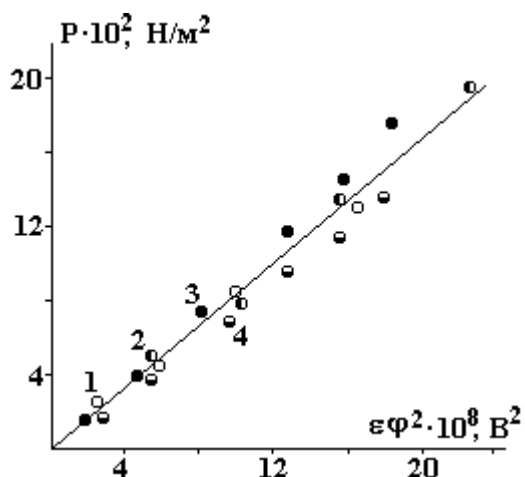


Рис. 4. Зависимость напора от комплекса $\varepsilon\varphi^2$. 1 – фреон-113; 2 – фреон-113-ацетон (~ 1%); 3 – керосин; 4 – трансформаторное масло

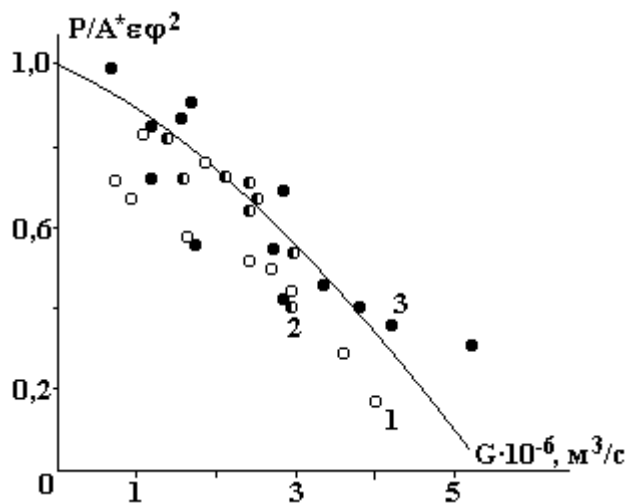


Рис. 5. Напорно-расходная характеристика. 1 – фреон-113; 2 – фреон-113-ацетон (~ 1%); 3 – керосин

Известно выражение для определения напора и расхода электрогидродинамического насоса типа “плоскость–плоскость” [5]:

$$P = A\left[1 - \exp\left(-\frac{1}{B\nu}\right)\right] - C\nu^2, \quad (1)$$

где A, B, C – параметры насоса:

$$A = 2 \frac{k-1}{k+1} \varepsilon_0 E_{cp}^2; \quad B = \frac{\tau}{l}; \quad C = \xi \frac{\gamma}{2};$$

ξ – коэффициент гидравлического сопротивления; τ – время релаксации зарядов; l – межэлектродное расстояние; γ – плотность рабочей жидкости; ε_0 – электрическая постоянная; v – скорость прокачки рабочей жидкости в насосе.

Полагая справедливость структуры выражения (1) для представленного насоса, определим из опытов коэффициенты A , B и C .

Для исследованного насоса коэффициент k , представляющий собой отношение электропроводности на эмиттере к электропроводности на коллекторе, достаточно высокий. Поэтому при $\frac{k-1}{k+1} \ll 1$ k является постоянной величиной для любых веществ, так как происходит полная электризация рабочей среды в межэлектродном промежутке. Напряженность поля определяется отношением разности потенциалов к межэлектродному расстоянию, которое для разных конструкций электрогидродинамического насоса будет различным:

$$E_{cp}^2 = \frac{\Phi^2}{l_{cp}^2}, \quad (2)$$

множитель $2 \frac{k-1}{k+1} \varepsilon_0 \varepsilon E_{cp}^2$ заменим выражением $A^* \varepsilon \Phi^2$, где $A^* = 2 \frac{k-1}{k+1} \frac{\varepsilon_0}{l_{cp}^2}$.

Следуя той методике, преобразуем и остальные члены выражения (1). Получим зависимость для напора и расхода электрогидродинамического насоса следующего вида:

$$P = A^* \varepsilon \Phi^2 \left[1 - \exp\left(-\frac{BI}{\varepsilon \Phi G}\right) \right] - C \gamma G^2, \quad \text{Н/м}^2; \quad (3)$$

где G – расход рабочей жидкости, м³/с; I – сила электрического тока, А; ε – диэлектрическая проницаемость жидкости.

Параметр A^* находится из условия $G = 0$:

$$P_{\max} = A^* \varepsilon \Phi^2 = P_{\text{стат}} \Rightarrow A^* = \frac{P_{\text{стат}}}{\varepsilon \Phi^2},$$

где $P_{\text{стат}}$ – статический напор, Н/м².

Константы C и B определяются по методу последовательных приближений.

Поскольку величина $[1 - \exp(-BI/\varepsilon \Phi G)]$ слабо зависит от расхода G и близка к единице, то C находится при больших значениях расхода G , когда член $C \gamma G^2$ большой. Тогда, пренебрегая $\exp(-BI/\varepsilon \Phi G)$, получаем

$$P \cong A^* \varepsilon P^2 - C \gamma G^2. \quad (4)$$

Подставив экспериментальные данные (в частности, из рис. 3) в выражение (4), определим значение константы C . Постоянная B определяется при малых значениях расхода G и найденном значении C из уравнения (3). Аналогично проводим следующее приближение, пока не достигнем удовлетворительного совпадения экспериментальных данных с зависимостью (3).

Для рассматриваемого насоса параметры A^* , B и C составляют соответственно $8,5 \cdot 10^{-7}$ кгм/(с²·В²); $2,48 \cdot 10^5$ кгм/(с⁴·А²); $2,85 \cdot 10^{10}$ м⁻⁴. При этих значениях A^* , B и C расчетное соотношение (3) для напора и расхода электрогидродинамического насоса удовлетворительно совпадает с экспериментальными данными (рис. 4 и 5).

Таким образом, результаты исследования показывают, что ЭГД-насос “перфорированное кольцо-труба”, обладает необходимой производительностью для прокачивания рабочей среды. При этом его характеристики могут быть рассчитаны по формуле (3).

ЛИТЕРАТУРА

1. Рубашов И.Б., Бортников Ю.С. Электрогазодинамика. М., 1971.
2. Стишков Ю.К., Остапенко А.А. Электрогидродинамические течения в жидких диэлектриках. Л., 1989.
3. Bologa M.K., Kozhevnikov I.V., Kozhukhar I.A., Motorin O.V. The Effect of Electrical Field Parameters, Medium Properties and Characteristics // Annual Report of Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Kitchener, ON, Canada, October 14-17. 2001. V. 1. P. 532–535.

4. *Kojevnicov I.V., Bologna M.K., Motorin O.V.* EHD-Pump Characteristics optimization // Annual Report of Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena Hyatt Regency Cancun, Quinta Roo, Mexico, October 20-24, 2002.

5. *Кожухарь И.А., Болога М.К., Малахов А.В.* Некоторые методы расчета электрогидродинамического насоса // Электронная обработка материалов. 1982. № 5. С. 74–75.

Поступила 18.01.05

Summary

Results of investigation of electrohydrodynamical pump "perforated ring-tube" are reported. Pressure-flow rate characteristics of the pump in the various dielectric media are obtained. Formulas for pressure-flow rate characteristics calculation, which are in a good agreement with experiment, are proposed.

Н.В. Полищук, И.М. Панченко*, М.С. Панченко, А.С. Мосиевич, А.Л. Панасюк

ЭНЕРГОГРАММЫ ИЗОТЕРМИЧЕСКОЙ СУШКИ КАПИЛЛЯРНО-ПОРИСТОГО ТЕЛА В СИЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЯХ

*Ровенский государственный гуманитарный университет,
ул. Бандеры, 12, г. Ровно, 33028, Украина*

**Европейский университет финансов, информационных систем,
менеджмента и бизнеса
ул. Киевская 64Б, г. Ровно, 33028, Украина*

Сушка является одним из трудоемких технологических процессов и достаточно широко распространена в народном хозяйстве каждой страны. На сушку с использованием тепла расходуется около 25% мировых энергоресурсов. Поэтому повышение эффективности сушки позволяет обеспечить интенсификацию производства, улучшение качества продукции, сокращение расходов топлива и энергии, снижение затрат обслуживания, охрану окружающей среды от вредных выбросов теплосушильных установок.

Как показывает практика последних лет, наиболее перспективными по влиянию на процесс сушки становятся электрические поля (ЭП). Существенно, что по сравнению с ИКС, СВЧ, электроконтактными, тепловыми и другими методами сушки, применение постоянных и промышленной частоты переменных ЭП значительно снижает потери энергии. Последнее делает сушку с прямым использованием энергии этих полей особенно экономной и эффективной [1]. В доразрядном неоднородном электрическом поле (НЭП) во влажное тело вводится незначительное количество энергии и поэтому его интенсифицирующее воздействие слабое. Следовательно, необходимо вводить большие потоки энергии в сушимые капиллярно-пористые тела (КПТ) с помощью разрядных НЭП. Для их создания требуется в сравнении с энергоемкой СВЧ-сушкой с использованием сложных и дорогостоящих генераторов, резонаторов и волноводов очень простое аппаратное оформление – источник высокого напряжения и электроды, как правило, в виде острие – плоскость, между которыми размещается сушимый материал. На него при атмосферном давлении воздействует либо низкотемпературная плазма коронного разряда (КР), либо высокотемпературная плазма искрового разряда (ИР). Использование этих газовых разрядов относится к области электронно-ионных технологий (ЭИТ). Отметим, что высокоинтенсивная СВЧ-сушка требует затрат электроэнергии на удаление из КПТ 1 кг влаги, чем традиционные в несколько раз больше методы сушки.

© Полищук Н.В., Панченко И.М., Панченко М.С., Мосиевич А.С., Панасюк А.Л., Электронная обработка материалов, 2005, № 3, С. 58–69.

4. *Kojevnicov I.V., Bologna M.K., Motorin O.V.* EHD-Pump Characteristics optimization // Annual Report of Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena Hyatt Regency Cancun, Quinta Roo, Mexico, October 20-24, 2002.

5. *Кожухарь И.А., Болога М.К., Малахов А.В.* Некоторые методы расчета электрогидродинамического насоса // Электронная обработка материалов. 1982. № 5. С. 74–75.

Поступила 18.01.05

Summary

Results of investigation of electrohydrodynamical pump "perforated ring-tube" are reported. Pressure-flow rate characteristics of the pump in the various dielectric media are obtained. Formulas for pressure-flow rate characteristics calculation, which are in a good agreement with experiment, are proposed.

Н.В. Полищук, И.М. Панченко*, М.С. Панченко, А.С. Мосиевич, А.Л. Панасюк

ЭНЕРГОГРАММЫ ИЗОТЕРМИЧЕСКОЙ СУШКИ КАПИЛЛЯРНО-ПОРИСТОГО ТЕЛА В СИЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЯХ

*Ровенский государственный гуманитарный университет,
ул. Бандеры, 12, г. Ровно, 33028, Украина*

**Европейский университет финансов, информационных систем,
менеджмента и бизнеса
ул. Киевская 64Б, г. Ровно, 33028, Украина*

Сушка является одним из трудоемких технологических процессов и достаточно широко распространена в народном хозяйстве каждой страны. На сушку с использованием тепла расходуется около 25% мировых энергоресурсов. Поэтому повышение эффективности сушки позволяет обеспечить интенсификацию производства, улучшение качества продукции, сокращение расходов топлива и энергии, снижение затрат обслуживания, охрану окружающей среды от вредных выбросов теплосушильных установок.

Как показывает практика последних лет, наиболее перспективными по влиянию на процесс сушки становятся электрические поля (ЭП). Существенно, что по сравнению с ИКС, СВЧ, электроконтактными, тепловыми и другими методами сушки, применение постоянных и промышленной частоты переменных ЭП значительно снижает потери энергии. Последнее делает сушку с прямым использованием энергии этих полей особенно экономной и эффективной [1]. В доразрядном неоднородном электрическом поле (НЭП) во влажное тело вводится незначительное количество энергии и поэтому его интенсифицирующее воздействие слабое. Следовательно, необходимо вводить большие потоки энергии в сушимые капиллярно-пористые тела (КПТ) с помощью разрядных НЭП. Для их создания требуется в сравнении с энергоемкой СВЧ-сушкой с использованием сложных и дорогостоящих генераторов, резонаторов и волноводов очень простое аппаратное оформление – источник высокого напряжения и электроды, как правило, в виде острие – плоскость, между которыми размещается сушимый материал. На него при атмосферном давлении воздействует либо низкотемпературная плазма коронного разряда (КР), либо высокотемпературная плазма искрового разряда (ИР). Использование этих газовых разрядов относится к области электронно-ионных технологий (ЭИТ). Отметим, что высокоинтенсивная СВЧ-сушка требует затрат электроэнергии на удаление из КПТ 1 кг влаги, чем традиционные в несколько раз больше методы сушки.

© Полищук Н.В., Панченко И.М., Панченко М.С., Мосиевич А.С., Панасюк А.Л., Электронная обработка материалов, 2005, № 3, С. 58–69.

В основе ЭИТ лежит воздействие сильных ЭП на заряженные частицы диспергированного материала. Электрогазоочистка, электроокраска, электросепарация, электросмешивание, нанесение порошковых покрытий в ЭП, электропрядение, электропечать, электрическая размерная обработка материалов, формирование новых и модификация прежних материалов, сильные ЭП в сельском хозяйстве – это далеко не полный перечень примеров использования сильных ЭП в разных технологиях [2].

На протяжении ряда лет делаются попытки применить ЭИТ для интенсификации процесса сушки. Такой вид сушки назван электронно-ионной сушкой (ЭИС). Использование ЭИС позволит реализовать на практике прогноз развития науки о сушке [3], по мере накопления экспериментальных данных по комплексным физическим характеристикам и электромагнитодиффузии влаги появится возможность применения новых методов сушки с использованием электромагнитных полей.

Одним из важнейших критериев эффективности данного вида сушки является величина энергии, необходимой для удаления из КПП массы m влаги, которая может находиться в различных состояниях и формах связи влаги с пористым скелетом твердой фазы. Классическим методом исследования энергетики процесса сушки с учетом различия состояний и форм связи влаги является метод энергограмм сушки (ЭС) В. М. Казанского [4]. С помощью ЭС определяют количество тепловой энергии, необходимой для испарения 1 кг влаги физико-механической и физико-химической формы связи. К первой относятся три вида капиллярной влаги, два из которых представляют воду, различную по особым состояниям (капиллярную и стыковую) в грубых порах (макрокапиллярах с $r > 10^{-7}$ м) тела, а третий – капиллярную влагу микропор (микрокапилляры с $r < 10^{-7}$ м). Влага физико-химической связи может состоять из осмотической воды и двух видов адсорбированной влаги – влаги полимолекулярных и мономолекулярных слоев.

Целью данной работы явилось исследование ЭС (зависимости удельных теплот испарения влаги L из КПП от времени сушки τ) и кривых скорости сушки ($dm/d\tau(\tau)$) силикагеля КСК–2 в условиях воздействия на его поверхность и пористый объем как доразрядных, так и разрядных НЭП.

Данный кинетический электрокалориметрический метод [5] служит для определения L при изотермической сушке тонких образцов с избытком увлажненных КПП при отсутствии теплообмена между поверхностью тела и окружающим нагретым воздухом. Уравнение теплового баланса процесса сушки при наличии внутреннего и внешнего источников тепла (электрического нагревателя и газового разряда)

$$L \frac{dm}{d\tau} + c_{i\dot{a}\dot{o}} m \frac{dT_{i\dot{a}\dot{o}}}{d\tau} - \alpha S (T_{\dot{a}\dot{c}\dot{a}} - \dot{O}_{i\dot{a}\dot{o}}) - I^2 R - iU = 0. \quad (1)$$

Здесь первый член учитывает тепло, расходуемое на испарение влаги; второй – на нагревание влажного тела; третий – на теплообмен образца с окружающей средой; четвертый учитывает мощность, которую выделяет электрический нагреватель; пятый член определяет мощность, вводимую во влажный образец за счет газового разряда; $dm/d\tau$ – скорость сушки; $c_{обр}$ – удельная теплоемкость влажного КПП; $dT_{обр}/d\tau$ – скорость нагревания образца; I – сила тока; R – сопротивление нагревателя; α – коэффициент внешнего теплообмена; S – поверхность образца; $T_{возд}$ – температура воздуха; $T_{обр}$ – температура образца; i – сила тока газового разряда; U – напряжение на электродах. В условиях принятого метода сушки разность температур $\Delta T = T_{возд} - T_{обр}$ должна компенсироваться нагревателем в калориметрической кювете. При этом $T_{обр} = T_{возд} = \text{const}$ и $dT_{обр}/d\tau = 0$. С увеличением тока газового разряда величина тока во внутреннем нагревателе уменьшалась на такую величину, чтобы компенсировать вводимую тепловую мощность за счет газового разряда. Величину L рассчитывали по формуле

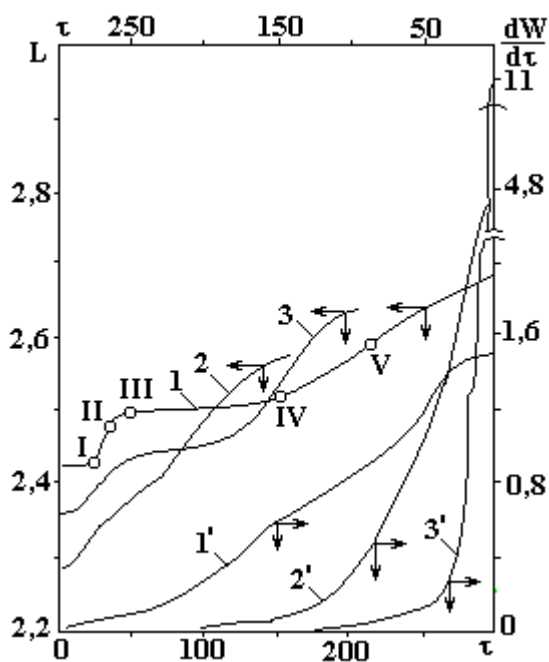
$$L = \frac{I^2 R + iU}{dm/d\tau}. \quad (2)$$

Таким образом, для расчета L надо иметь кривую тока в нагревателе кюветы $I(\tau)$, кривую тока газового разряда $i(\tau)$ и кривую скорости сушки ($dm/d\tau(\tau)$). Последняя получается из кривой сушки (убыли со временем τ массы m влажного образца) $m(\tau)$, отражающей изменение влагосодержания W образца во времени, дискретным дифференцированием. Схема и конструкция использованной установки, методика работы на ней и подготовка образцов к опыту в основном такая же, как и описанная в [5].

Как образец исследования применялся силикагель КСК-2. Это модельное КПП. Он типичный представитель эталонного ряда однородно-крупнопористых промышленных сорбентов состава $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$. Сорбционные свойства этого сорбента по воде представлены в [6]: влага монослоя – 6,8; общее количество адсорбционно-связанной влаги – 16,6; максимальное гигроскопическое влагосодержание – 102,7. Структурные характеристики: плотность сухого материала – $0,39 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$; истинная плотность – $2,240 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$; кажущаяся плотность – $0,671 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$; средний размер микропор – $60 \cdot 10^{-10} \text{ м}$; объем микропор – $1,041 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{кг}$. В опытах использовалась фракция с диаметром зерен $0,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$. Образец с диаметром зерен $0,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ слоем толщиной $2,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ засыпался в квадратную фторопластовую кювету со стороной $4 \cdot 10^{-2} \text{ м}$ на нижний электрод, который представлял собой заземленную тонкую металлическую пластинку. Под ней размещался внутренний электронагреватель, который компенсировал разность температур $\Delta T(\tau)$ между окружающей средой и влажным образцом, а группа спаев дифференциальной термопары, другая группа находилась в воздухе над влажным образцом. Дифференциальная термопара служила датчиком для компенсатора ΔT .

Для создания НЭП в кювете использовалась следующая система электродов. Одним из них служила пластинка. Роль второго электрода исполняли пять тонких металлических игл, соединенных между собой и расположенных таким образом, что острия их могли находиться на расстоянии $0,3 \div 2 \cdot 10^{-2} \text{ м}$ от поверхности обводненного образца. Верхняя группа спаев дифференциальной термопары находилась достаточно далеко, чтобы исключить влияние на нее НЭП. В качестве измерительного устройства термо-э.д.с. при индикации влияния ЭП использовался прибор ПП – 63. Такое число игл выбиралось исходя из известных экспериментальных данных, свидетельствующих о том, что при большем количестве их ЭП становится близким к однородному. Постоянная разность потенциалов до 25 кВ создавалась с помощью высоковольтного источника «Разряд-1». Это маломощный, с плавно регулируемым напряжением, источник, снабженный защитой от возникновения дугового разряда (во избежание плавления или подгорания твердой фазы КПП).

За сутки перед опытом силикагель засыпался в кювету и увлажнялся с избытком дистиллированной водой до полной влагоемкости (набухания), так что над слоем образца образовывалась пленка воды толщиной $2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$. В зависимости от расстояния электродов до поверхности образца и разности потенциалов U между электродами изменялись и значения тока i КР и ИР, а следовательно, и вводимая средняя мощность $P_s = iU/S$, где S – площадь поверхности воды, покрывающей образец. То, что мы называем влагой, естественно, является слабым электролитом вследствие того, что слой дистиллированной воды очень быстро становится проводящим (насыщается ионами за счет абсорбции ионов воздуха, растворения твердого скелета образца и металла пластинки, электролиза воды, электрохимических и других неконтролируемых процессов).



Энергограммы (L , МДж/кг – τ , мин) – 1,2,3 и кривые скорости сушки (dW/dt , %/мин – τ , мин) – 1',2',3' силикагеля КСК-2 при температуре 303 К. 1,1' – без поля и в условиях наложения НЭП ($\nabla E \sim 10^{12} \text{ В/м}^2$); 2,2' – в ЭП коронного разряда; 3,3' – в ЭП искрового разряда

На рисунке представлены энергограммы $L(\tau)$ и кривые скорости сушки $dW/d\tau(\tau)$, полученные без полей и в условиях воздействия доразрядного НЭП, а также разрядных НЭП в виде КР и ИР. Доразрядное ЭП понимается в том смысле, что не происходит тот или иной самостоятельный разряд (КР или ИР). При несамостоятельном разряде в НЭП в наших условиях протекают токи ($i = 0 - 1 \cdot 10^{-7}$ А). Изменение полярности постоянного доразрядного НЭП практически не влияет на энергограммы и кривые скорости сушки. В постоянном доразрядном НЭП с максимально возможным градиентом напряжения $\nabla E \sim 10^{12}$ В/м² возле острия в начале процесса, когда еще не происходит сушка силикагеля, а идет процесс испарения избытка свободной воды, расхождение кривых $L(\tau)$ и $dW/d\tau(\tau)$ в полях и без них практически отсутствует, то есть влияние таких полей не проявляется на энергетике сушки, ибо вводимая мощность была крайне незначительной и составляла около 0,1 Вт/м². В НЭП на каждую дипольную молекулу воды действует сила

$$f_1 = p_e \nabla E \cos \alpha, \quad (3)$$

где p_e – дипольный момент молекулы воды; ∇E – градиент числового значения напряженности E НЭП; α – угол между осью диполя и направлением ЭП. Но ее величина крайне незначительная по сравнению с энергией водородных связей между молекулами жидкости [7], поскольку величина $p_e = 6 \cdot 10^{-30}$ Кл·м, а величина ∇E на поверхности воды практически равна нулю, поскольку избыточный слой воды для высоких напряженностей является проводящим (электропроводность $\sigma \sim E^2$) и линии напряженности входят в него почти перпендикулярно. В пределах горизонтальных участков энергограмм и кривых скорости сушки происходит испарение избытка свободной воды. При этом не обнаружено заметной интенсификации испарения жидкости, поскольку начальные горизонтальные участки кривых не смешались. Таким образом, НЭП несамостоятельного разряда не способно заметным образом интенсифицировать испарение даже свободной воды. Это же явление было обнаружено и в [8].

С окончанием испарения покрывающей пленки воды открываются макропоры межзернового пространства образца (точка перегиба I ЭС) и скорость испарения лимитируется массопереносом внутри макропор. Величина L увеличивается, поскольку при сохранении условия изотермичности (сохранении энергоподвода) снижается интенсивность испарения. Это обусловлено уменьшением площади испарения, и к тому же мениски воды капиллярного состояния опускаются внутрь образца, что удлиняет путь диффузии молекулам водяного пара. При этом уже отсутствует экранирующая проводящая пленка избыточной влаги и силовые линии поля входят в зерна силикагеля не под прямыми углами. Следовательно, теперь уже как в зернах силикагеля, так и в макрокапиллярах $\nabla E \neq 0$. Но все же величина силы f_1 еще остается очень малой, чтобы заметно снизить межмолекулярные взаимодействия в поверхностных слоях менисков. При этом на каждый единичный объем поляризованного столбика капиллярной жидкости будет действовать сила

$$f_2 = 0,5 \varepsilon_0 (\varepsilon_{ж} - 1) \nabla E^2, \quad (4)$$

где ε_0 – электрическая постоянная; $\varepsilon_{ж}$ – диэлектрическая проницаемость жидкости.

Соприкасающиеся с нижним электродом столбика проводящей жидкости в макрокапиллярах подвергаются контактной зарядке, в результате чего они приобретают избыточный заряд знака этого электрода. Тогда пондеромоторная сила, действующая на каждую единицу объема воды, содержащей величину свободных зарядов ρ_e , будет равна

$$f_3 = \rho_e E. \quad (5)$$

Но поскольку сдвига кривой $L(\tau)$ не происходит, то, видимо, и силы (4) и (5) доразрядных НЭП все еще остаются недостаточными, чтобы уменьшить работу выхода молекул или гидратированных ионов с жидкости. Эти силы в расчете на объем каждой молекулы, принадлежащей единице объема жидкости, еще заведомо меньше водородных сил связи между молекулами воды. К тому же и плотность свободных зарядов в доразрядном поле очень малая. От точки II до точки III происходит испарение толстых макропленок стыковой влаги, непрерывно покрывающих зерна силикагеля. Это также свободная влага, то есть не связанная со стенками капилляров адсорбционными силами. При этом НЭП не оказывает заметного влияния на величину L , хотя скорость сушки продолжает падать. Это происходит скорее не за счет увеличения энергии отрыва молекул от поверхности пленки, а вследствие увеличения пути диффузии их в макропорах образца. При этом величина тока в кювете умень-

шается настолько, что замедляется рост величины L . При испарении влаги микрокапилляров (точки III–IV), а также адсорбированной влаги полимолекулярных слоев (точки IV–V) и влаги мономолекулярного слоя (после точки V) энергия физико–механической связи воды в микрокапиллярах и физико–химической связи молекул влаги с твердой фазой образца постепенно увеличивается, а поэтому продолжается дальнейший рост теплоты фазового перехода. В этих условиях НЭП тем более не может проявить своего влияния.

Теплота испарения L идет на работу A_1 , совершаемую молекулами при прохождении сквозь поверхностный слой жидкости, и на работу A_2 , связанную с увеличением удельного объема $V_{жс}$ вещества при переходе из жидкого в газообразное состояние:

$$L = A_1 + A_2. \quad (6)$$

Толщина поверхностного слоя, в пределах которого действуют на молекулу силы притяжения, есть величина порядка радиуса молекулярного действия r . Обозначая среднюю силу, действующую на длине r , через $\langle f \rangle$, получаем выражение для работы вырывания одной молекулы:

$$\Delta A = \langle f \rangle \cdot r. \quad (7)$$

Работа, совершаемая всеми молекулами, находящимися в единице массы жидкости,

$$A_1 = n_{жс} \cdot \Delta A = n_{жс} \cdot \langle f \rangle \cdot r, \quad (8)$$

где $n_{жс}$ – число молекул в единице массы жидкости. Работа

$$A_2 = p (V_n - V_{жс}), \quad (9)$$

где V_n – удельный объем пара; p – давление, при котором происходит испарение. Подставляя (8) и (9) в (6), получаем

$$L = n \cdot \langle f \rangle \cdot r + p (V_n - V_{жс}). \quad (10)$$

Соотношение (10) не позволяет непосредственно вычислить L , поскольку остаются неизвестными точные значения $\langle f \rangle$ и r , но оно показывает, что L зависит от той же величины молекулярного взаимодействия $\langle f \rangle$, которая обуславливает и наличие поверхностного натяжения. При повышении температуры T уменьшаются сила $\langle f \rangle$ и разность удельных объемов $V_n - V_{жс}$, откуда, по (10), с увеличением T убывает и L . При приближении T к критической температуре T_k величина $\langle f \rangle$ стремится к нулю, и одновременно исчезает различие между V_n и $V_{жс}$. Поэтому $L \rightarrow 0$. Последний член в (10) составляет обычно около 15% от величины L . Следовательно, для существенного изменения L необходимо прежде всего добиться изменения величины первого слагаемого за счет изменения величин $n_{жс}$, $\langle f \rangle$ и r . Наиболее значительным фактором влияния на эти величины является T . Но повышение T сопряжено с увеличением затрат теплоты, которая нагревает не только жидкость, но и всю массу сушильной установки. К тому же значительное количество теплоты выбрасывается в окружающую среду, вызывая ее тепловое загрязнение.

Величина энергии водородной связи молекул воды составляет в обычных условиях несколько десятых эВ. Чтобы существенно не повышать T и разорвать такую связь, нужно использовать КР или ИР, где энергия бомбардирующих поверхность влажного КПП электронов и ионов заведомо превышает эти величины и вместе с тем их действие локализовано только на влажных участках сушильного объекта.

Возникновение самостоятельного газового разряда, так называемого темного КР, образующегося при токе $3 - 5 \cdot 10^{-6}$ А, сопровождается немедленным увеличением скорости испарения. При этом возле каждого острия возникает зона ионизации, за пределами которой образуется электрический ветер (ЭВ), достигающий поверхности воды. Вводимая мощность составляет всего лишь 1 Вт/м^2 , и она заметным образом не влияет на выделяемую мощность электронагревателем в калориметрической кювете. Основным, интенсифицирующим сушку, фактором является ЭВ [8], благодаря которому покрывающий образец слой жидкости приходит в волнообразное движение. Вследствие внутреннего трения образуются турбулентные потоки внутри жидкости, тем самым способствуя увеличению кинетической энергии отдельных молекул. В результате растет число молекул, вылетающих из жидкости (уменьшение $n_{жс}$), что ускоряет парообразование. Отраженные потоки ЭВ уносят значительное количество пара от поверхности высушиваемого КПП. Это способствует уменьшению второго члена в (10). Кроме того, молекулы воды, содержащиеся в воздухе, разлагаются в ЭП ионизатора [9] и начальная влажность сушильного агента снижается, как и парциальное давление насыщенного пара. Образование одного иона H_2O^+ вследствие электронного удара ведет, согласно кластерной теории, к

диссоциации пяти молекул водяного пара. Это также приводит к уменьшению второго члена в (10). Следовательно, прохождение электрического тока КР способствует уменьшению парциального давления пара в окружающем воздухе. Скорость понижения давления паров воды связана с током проводимости в парогазовой среде уравнением [10]:

$$dp/d\tau = ai, \quad (11)$$

где коэффициент a зависит от размеров и формы сушильной камеры и не зависит от давления и напряженности ЭП в разряде.

Насыщение поверхностного слоя воды, покрывающей образец, ионами объемного заряда и молекулами озона существенно снижает поверхностное натяжение [11]. Это приводит к уменьшению работы выхода молекул в пограничный слой за счет уменьшения $n_{ж}$ и $\langle f \rangle$. Кроме того, электронно-ионной бомбардировкой разрушается как поверхностный слой (уменьшение $n_{ж}$), так и пограничный слой (уменьшается p). В результате уменьшается диффузионное сопротивление пограничного слоя. Как следствие, уменьшается число соударений выходящей из жидкости молекулы с молекулами пограничного слоя, что эквивалентно уменьшению величины $\langle f \rangle$ в (10). Часть молекул водяного пара конденсируется на ионах объемного заряда, образуя заряженные микрокапельки. При этом также уменьшается концентрация молекул пара в пограничном слое (уменьшение p в (10)). За счет воздействия ЭВ с поверхности жидкости электрогазодинамическими потоками в пограничный слой и за его пределы выносятся заряженные капельки. Этому также способствует электронно-ионная бомбардировка поверхности жидкости. Заряд отдельной капельки пропорционален ее площади [8, 12] и средней плотности поверхностного заряда. В результате возникают кулоновские силы, которые способствуют интенсивному рассеиванию скопившемуся над поверхностью воды пара (уменьшение p в (10)). Следует отметить очень большие коэффициенты распыления (от 500 до 1000), определяемые как число молекул воды, покидающих раствор в расчете на один попадающий в раствор ион [13], поскольку ионы, бомбардирующие поверхность раствора, имеют величины энергии, сравнимые с удельной теплотой испарения воды. Но затраты энергии на неравновесный процесс переноса заведомо должны быть больше термодинамической теплоты испарения. Столь высокие коэффициенты переноса в [13] объясняются переносом крупных кластеров, сформировавшихся в приповерхностном слое вокруг ионов, а состояние в этом слое воды иное, чем в исходной воде. Оно отличается прежде всего разорванной сеткой водородных связей под влиянием внедренных ионов, что уменьшает затраты энергии на перевод воды в газовую фазу. Вода является ассоциированной жидкостью. Электронно-ионная бомбардировка приводит к разрыву ассоциатов в поверхностном слое воды, что уменьшает работу выхода отдельных молекул из этого слоя. В этой же работе отмечается, что в зону плазмы могут переноситься как растворитель, так и растворенное вещество, что инициирует изменение как состава плазмы, так и окислительно-восстановительные реакции в системе.

Уменьшение L в КР приводит к увеличению числа молекул, покидающих поверхностный слой жидкости. Действительно, согласно закону Больцмана число молекул в единице объема, которые имеют потенциальную энергию U , определяется равенством

$$n = n_0 \cdot e^{-U/kT}, \quad (12)$$

где n_0 – число молекул в единице объема, которые имеют нулевую (относительно U) энергию; k – постоянная Больцмана. Уравнение (12) можно применить к интересующему нас случаю равновесия жидкости с насыщенным паром. Средняя энергия молекулы, которая вылетела с жидкости, отличается от средней энергии молекулы в середине жидкости на величину $\mu L/N_A$, где μL – молярная теплота испарения; μ – молярная масса жидкости; N_A – число Авогадро. Величина $\mu L/N_A$ является собой энергию U , которая входит в формулу (12). Поэтому плотность молекул пара n_n определяется равенством

$$n_i = n_{ж} e^{-\frac{\mu L}{N_A kT}}, \quad (13)$$

где $n_{ж}$ – плотность молекул жидкости, потенциальную энергию которых можно положить равной нулю. Следовательно, чем меньше величина L в силу воздействий разрядных полей на жидкость, тем интенсивней идет процесс испарения, а следовательно, и процесс сушки. При точном рассмотрении равенства (13) нужно учесть, что величины L и $n_{ж}$ сами зависят от температуры.

В [14] проведено сравнение воздействия на процессы испарения при одинаковых скоростях ЭВ и потоков воздуха из сопла. Оказалось, что плотность потока испаряемой влаги в первом случае выше в два–восемь раз. Из этого следует, что электрогазодинамический поток отличается от газодинамического значительной энергоэффективностью. В зависимости от силы тока и полярности элект-

тродов 10–25 % общей энергии КР, подведенной в пограничный слой, приходится на механический унос водяного пара и капельной влаги. Следовательно, ускоряющие факторы и, в первую очередь, значительная энергоэффективность, строгая направленность и локальный характер действия плазмы КР на поверхность жидкости и пограничный слой делают КР исключительно удобным методом энергоподвода и средством ускорения сушки сильно увлажненных КПТ за счет изменения структуры воды и интенсификации внешнего энерго- и массообмена.

Из представленных на рисунке кривых видно, что при сушке с использованием КР общая продолжительность процесса уменьшается почти в три раза, а энергетические затраты – в среднем на 20%. Наиболее значимая интенсификация процесса наблюдается при испарении свободной жидкости и влаги макрокапилляров. Такую же степень интенсификации сушки можно достигнуть при увеличении температуры сушильного агента на несколько десятков градусов. Но это вызывает значительное увеличение расхода теплоты, и вместе с тем жесткий режим гигротермической обработки способствует развитию необратимых структурных изменений в коллоидных КПТ.

Проведенные опыты [1] по определению удельных теплот испарения влаги из силикагеля КСМ–5 в зависимости от W показывают, что в ЭП КР наблюдается уменьшение тепловых затрат на единицу массы испаряемой влаги не только свободной, но и удерживаемой как капиллярными, так и адсорбционными силами связи, соответственно от 9 до 3 %. Последнее позволяет сделать вывод, что с помощью ЭП КР можно управлять не только параметрами внешнего и внутреннего тепло- и массопереноса, но и энергиями и формами связи влаги. Подтверждением служат также резкое сужение петли сорбционного гистерезиса и падение равновесных влагосодержаний КСК–2 и других образцов КПТ при снятии изотерм сорбции в КР [15]. В [9] при сушке ионизированным воздухом без подвода тепла к высушиваемой бумаге найдено, что удельный расход электроэнергии составил 0,63 – 1,11 кВт·ч/кг влаги. Последний показатель экономически весьма рентабелен, поскольку он в 3 – 1,5 раза меньше нынешних затрат при тепловой сушке. Применения ионизированного воздуха как сушильного агента ускоряет сушку бумаги на 44 – 160 % в зависимости от степени ионизации воздуха, типа короны, заряда корпуса сушилки и высушиваемого материала. При этом ЭП находилось за пределами пространства испарения и действовало только на сушильный агент. Качество таковым образом высушиваемой бумаги улучшается, поскольку сушка ведется при комнатной температуре, то есть на несколько десятков градусов меньшей, чем в обычных условиях производства. Аналогичные результаты получены при сушке яблочного пюре в тлеющем разряде [16]. Причем вкусовые качества готового продукта оказались выше полученного при обыкновенной сушке. Использование ионизированного воздуха для созревания сыров позволило не только интенсифицировать процесс, но и повысить их пищевые показатели и улучшить санитарно–гигиенические условия производства [17].

Заметим также, что в несколько большей мере ускоряет процесс (сушки при одинаковых остальных параметрах) переменный КР промышленной частоты. Он требует минимальных затрат энергии. Причины этого объяснены в работах [8, 14, 18, 19]. Если в первом периоде, когда удаляется избыток свободной воды, а затем влага макрокапилляров из зернистого слоя силикагеля, интенсификация сушки достигает наибольшей величины, то во втором периоде интенсифицирующее действие КР уменьшается по мере уменьшения влагосодержания образца в связи с углублением фронта испарения в микропоры зерен. Степень проникновения ЭВ в микропоры уменьшается пропорционально их эффективному диаметру, и одновременно увеличивается сопротивление внутреннему переносу молекул пара к поверхности зерен. Но зато возрастает в большей мере, чем в доразрядном НЭП, неоднородная поляризация высушенной части твердого скелета КПТ. Это равносильно внедрению НЭП в микропоры КПТ, но с напряженностью в ϵ меньшей, чем в паровоздушной среде. Вместе с поляризационными зарядами возникают и свободные. Неравномерное оседание и адсорбция ионов на поверхности зерен и макрокапилляров, а также частично в микропорах силикагеля сопровождаются возникновением внутреннего НЭП с градиентом в несколько kV/m^2 и протеканием разрядного тока (частичные разряды). Это вызывает в образце электромиграцию жидкости и электродиффузию молекул пара в микрокапиллярах в зону испарения. Накопление ионов приводит также к запасанию энергии КПТ в гигроскопической области влагосодержаний. Это вызывает отклонение системы от термодинамически равновесного и переходу в метастабильное состояние, что обуславливает изменение внутренней энергии связи влаги и уменьшение поверхностного натяжения влаги микрокапилляров. Последнее приводит к интенсификации внутреннего массопереноса по механизму, описанному в НЭП [20]. Дальнейшее увеличение тока (естественно, и межэлектродного напряжения, а также напряженности НЭП) до $1 - 10 \cdot 10^{-5}$ А приводит к возникновению светлого (стримерного) КР, сопровождающегося ростом коэффициента интенсификации испарения со свободной поверхности жидко-

сти до значений 10–12. При этом вводимая удельная мощность возрастает почти на два порядка. При разности потенциалов 8 кВ ток КР изменялся в процессе отдельного опыта от 0,4 до 0,1 мА.

Таким образом, по сравнению с другими технологическими применениями электричества ЭИТ обладает рядом преимуществ, связанных с непосредственным силовым воздействием ЭП на разные фазы КПП без промежуточных трансформаций и потерь энергии. Это и приводит к уменьшению величин L в КР для влагосодержаний всех состояний и форм связи влаги с КПП.

Увеличение мощности еще на порядок переводит КР в ИР. Этот вид характеризуется поднятием электролита [21] под игольчатыми электродами. С ростом электропроводности происходит увеличение высоты поднятия электролита для обеих полярностей. У поверхности воды не очень интенсивный ИР растекается и имеет вид фигур Лихтенберга. При визуальном наблюдении обнаружена неустойчивость поверхности жидкости не только под данным острием, но и в областях, прилегающих к нему. Видимо, в этом случае происходят деформации поверхности за счет эффекта втягивания жидкости в межэлектродное пространство при воздействии силы

$$f_1 = 0,5\varepsilon_0(\varepsilon_{ж} - \varepsilon_{п})E_{п} E_{ж}, \quad (14)$$

где $\varepsilon_{ж}$ – диэлектрическая проницаемость жидкости; $E_{п}$ – напряженность ЭП в паровой фазе в непосредственной близости к поверхности жидкости в пограничном слое; $E_{ж}$ – напряженность ЭП в жидкости возле поверхности раздела жидкой и паровой фаз. Под каждым игольчатым электродом на поверхности жидкости будут концентрироваться ионы противоположного знака с поверхностной плотностью $\sigma = 2\varepsilon_0\varepsilon E$, где $E = 0,5(E_{п} - E_{ж})$, что обуславливает дополнительное кулоновское взаимодействие заряженной жидкости в данном месте с тем или иным игольчатым электродом. Этому препятствуют гравитационные силы и силы поверхностного натяжения. Здесь развивается неустойчивость Тонкса–Френкеля, которая зависит от отношения величин электрических сил к гравитационным и поверхностным силам на свободной поверхности. Это приводит к возникновению капиллярных волн на поверхности тонкого слоя жидкости. На гребнях волн, как и на любом острие, концентрация поверхностного заряда может достигнуть критической величины. Когда наступит преобладание электрической силы над силами поверхностного натяжения и гравитации, происходит выброс высокодисперсных капелек.

При пробое промежутка наблюдается перебрасывание электролита на металлические игольчатые электроды. Видимо, гидратированные ионы соответствующего знака, под действием возрастающих с уменьшением расстояния к каждой игле кулоновских сил, вырываются из поверхностного слоя воды и устремляются с нарастающей скоростью к ним. При этом они вытягивают за собой за счет сил вязкого трения нити воды. На определенной высоте над поверхностью воды происходит разрывание нитей на отдельные капельки при развитии вдоль их разного рода неустойчивостей. Более интенсивные перебросы наблюдаются в случае положительной полярности игольчатых электродов.

С дальнейшим увеличением интенсивности ИР картину развития его можно представить согласно [22]. В межэлектродном промежутке образуется сравнительно узкий токопроводящий канал с высокой температурой ионизации. За счет выделения джоулевого тепла в нем происходит повышение давления, а у металлического электрода образуется светящееся облако паров электролита. В следующий момент канал разряда начинает расширяться со сверхзвуковой скоростью и вызывает распространение ударной волны. При этом плотность газа в канале очень мала, так как подавляющая часть массы движущегося газа из него вытеснена, вследствие чего при завершении разряда происходит втягивание раствора в искровой канал. Ударная, а затем звуковые волны турбулизуют окружающую среду, вызывая в ней интенсивное движение масс воды и воздуха. В них возникают хаотические, в том числе и вихревые движения, интенсифицирующие испарение влаги и отвод пара с пограничного слоя.

В [23] высказано предположение, что на подъем поверхности электролита в ЭП влияет поверхностная плотность заряда, которая при наложении ЭП зависит от наличия зарядов, имеющихся в двойном слое при отсутствии внешнего поля, и зарядов, возникающих вследствие электростатической индукции. При возникновении ЭП все ионы, находящиеся в межэлектродном пространстве, перемещаются к электродам соответствующей полярности, и в двойном слое происходит изменение рода проводимости. При этом ионы в растворе движутся со скоростью, на несколько порядков меньшей, чем в газе. При достаточной напряженности поля этот процесс заканчивается электрическим пробоем межэлектродного пространства. Между электродами возникает интенсивный ИР – это электрические импульсы, длительность которых не превышает 10^{-3} с. Через образовавшийся в определенный момент практически безинерционный канал сквозной проводимости, обладающий ничтожно малым омическим сопротивлением, система броском освобождает накопленную энергию. При этом

если игольчатый электрод – катод, то в рассматриваемом межэлектродном пространстве имеет место только электронная проводимость, двойной электрический слой перестает существовать. Несущийся с большой скоростью пакет электронов, ударившись о поверхность анодного электролита и не встретив механического сопротивления (как при металлическом аноде), глубоко проникает в толщу электролита, нейтрализуя этим длинную цепочку ионов. От ударного воздействия электронного пакета жидкость сначала прогибается, а затем в данном месте резко поднимается, вызывая выбросы частиц воды. На подъем электролита влияют плотность электролита, вязкость и особенно силы поверхностного натяжения, зависящие от концентрации зарядов. Зарядение поверхности жидкости ионами одного знака приводит к уменьшению поверхностного натяжения. При достаточно высокой их концентрации возникает аperiодическая неустойчивость поверхности и происходит сброс избыточного поверхностного заряда путем эмиссии высокодисперсных капелек.

Если катод – это электролит на металле, то необходимо принять во внимание, что любая поверхность твердого вещества (металлическая пластинка в кювете), даже после самой тщательной механической обработки, имеет множество выступов и впадин, по своим размерам намного порядков превосходящих диаметр иона [23]. Поэтому ЭП на поверхности плоского электрода неравномерно. На ней есть точки, где напряженность поля может достичь значения 10^{10} В/м, что является уже достаточным для вырывания электронов из выступов металлической поверхности. Дальнейшее повышение напряжения все более увеличивает энергию отрывающихся электронов, в результате чего появляется стример, перемещающийся к аноду и ионизирующий на своем пути молекулы воды и газа. В месте выхода стримера, а чуть позже электронного пакета поверхность жидкости вспучивается. Этому явлению способствуют также электрохимические и электролизные процессы с выделением на катоде водорода и других газов, обуславливающие появление пузырьков, которые резко снижают плотность поверхностного слоя воды. Скорость их всплытия резко интенсифицируется в НЭП. Лопаясь на поверхности, они выбрасывают водяной пар и выталкивают в пограничный шар частицы жидкости, которые уносятся интенсивно движущимися воздушными потоками. В пределах пограничного слоя, который является основным сопротивлением внешнему теплообмену, ЭП в условиях ИР является сильно неоднородным. Если учесть, что в пограничном слое имеется линейная зависимость диэлектрической проницаемости ϵ_n водяных паров от плотности и большая концентрация свободных ионов ρ_e , то согласно известному соотношению электрогидродинамики объемная сила

$$f = 0,5\epsilon_0(\epsilon_n - 1) \nabla E^2 + \rho_e E, \quad (15)$$

вызывает значительную электроконвекцию, с образованием микровихрей, разрушающих структуру пограничного слоя. Последние могут втягивать микрообъемы жидкости и при отрыве от поверхности жидкости уносить их.

Вылетающие из жидкости электроны гидратированные, но при соударениях с молекулами газа теряют свою гидратную оболочку. Отметим, что в [24] под воздействием сильно неоднородного ЭП ИР под верхним стержневым электродом наблюдался подъем водного электролита. При этом поверхность электролита принимала конусообразную форму и электрический пробой разрядного промежутка осуществлялся между электролитным “острием” и металлическим электродом. Поверхностное натяжение оказывает влияние на форму образующегося электролитного “острия”, то есть на геометрию разрядного промежутка, а следовательно, и на напряжение ЭП. На ведущую роль свободных зарядов при перебросах жидкости указывает их незначительность в переменном поле ИР.

Деформация свободной поверхности электролита в пределах нескольких миллиметров в зависимости от напряжения под каждым острием происходит в результате всех взаимосвязанных факторов и стимулирует образование хаотических волновых процессов во всем тонком слое покрывающей жидкости [7, 8, 25]. Это увеличивает скорость испарения воды тем больше, чем большая мощность вводится в электролит с ИР. Поэтому величина L при испарении покрывающей пленки воды существенно уменьшается по сравнению с сушкой в КР, а dW/dt образца также интенсивно увеличивается по сравнению с сушкой в доразрядном НЭП. Это происходит не столько за счет собственно процесса испарения, сколько в результате изменения структуры поверхностного слоя воды, электропереноса при перебросах жидкости на электроды и выноса частиц жидкости в газовую фазу. При этом не расходуется теплота фазового перехода. Положение горизонтального участка ЭС в ИР, отвечающего удалению свободной влаги, соответствует испарению ее без поля почти при 363 К, то есть на 60 К больше, чем это происходит на самом деле. В первом периоде при воздействии ИР испаряется не только свободная влага, влага капиллярного и стыкового состояний, но и частично влага микрокапилляров (влага капиллярной конденсации и полимолекулярная влага), что резко сокращает весь процесс сушки. Это происходит благодаря поднятию влаги этих видов к поверхности КПП и концен-

трированию ее под игольчатыми электродами. Значительное поднятие воды в макрокапиллярах обнаружено в [26, 27].

Из приведенных результатов следует, что решающее значение для интенсификации внешнего энерго- и массообмена в НЭП при электроконвективной сушке имеет ускорение процесса в первом периоде за счет КР и ИР. Здесь испаряется из сильно увлажненных КПТ излишек практически свободной влаги, прилипшей к поверхности: влага намокания, набухания, механически захваченная и иммобилизованная при образовании тела в водной среде, а также влага капиллярного и стыкового состояний в макропорах, поглощенная при непосредственном контакте КПТ с водой. С помощью КР, и в особенности ИР, при атмосферном давлении можно вводить любые мощности в свободную воду. Пока не испарится свободная влага, газовые разряды не приводят к существенным для практики производственных процессов электроэрозии, деформации и дробления сушеного тела, как в случае гигроскопических влагосодержаний.

При выключении ЭП запасенная в первом периоде электронно-ионной сушки энергия может использоваться и во втором ее периоде. В частности, может использоваться накопленная электрическая энергия (осевшие ионы на внешней и внутренней поверхностях КПТ, создающие внутреннее НЭП с высоким ∇E и частичными разрядами) для десорбции адсорбированной влаги. Под действием высоких E ЭП в местах пониженной электрической прочности диэлектрических сред (воздушные включения между зёрнами адсорбента) возникают частичные разряды [28], которые представляют собой пробои газовых включений в виде микрозарядов. Во втором периоде (гигроскопические влагосодержания КПТ), когда нежелательны электро- и тепловая эрозии поверхности сушеного тела и высокие темпы сушки, приводящие к его деформации, образованию трещин и вообще к модификации физических и химических свойств, целесообразно использовать доразрядное НЭП либо НЭП темного КР, интенсифицирующие в основном внутренний массоперенос в КПТ. Если эрозия поверхности образца не является помехой для данного вида производства или, наоборот, желательна модификация поверхностных свойств КПТ, то целесообразно использовать светлый КР или насыщенный ИР. В периоде падающей скорости, когда удаляется влага микрокапилляров и адсорбционно-связанная влага, работа отрыва одного моля воды без изменения состава определяется соотношением

$$E = - RT \ln \varphi, \quad (16)$$

где φ – относительное давление пара. Тогда скрытая теплота фазового перехода связанной влаги определяется из соотношения [29]:

$$L = L_0 + E, \quad (17)$$

здесь L_0 – теплота фазового перехода свободной влаги. Определяемая из изотерм сорбции величина L для гидрофильных тел на 10–50% больше от L_0 и поэтому, естественно, требует для своего удаления соответственно больших энергетических затрат, тем более когда нужно максимально ускорить этот процесс. В этом случае для быстрого ввода большой энергии нужно использовать интенсивный ИР.

Таким образом, целый ряд специфических факторов, ускоряющих внешний и внутренний энерго- и массоперенос, и в первую очередь, большая энергоэффективность, строгая пространственная направленность и сконцентрированный только на влажных участках, а не на всей поверхности сушеного КПТ, то есть локальный характер действия плазмы КР, и в особенности ИР (такую минимальную площадь воздействия и степень концентрации энергии невозможно получить никакими другими способами [30]), делают эти газовые разряды исключительно удобным методом энергоподвода и средством ускорения сушки сильно увлажненных КПТ. При этом скорость сушки в первом периоде возрастает в десятки раз, во втором – в несколько раз при минимальных затратах энергии в сравнении с тепловой сушкой. Это достигается за счет ЭВ, сопровождающего КР, и избирательного ввода за счет ИР в наиболее влажные участки большой плотности локальных потоков электрической энергии. Поэтому электронно-ионную сушку можно использовать как самостоятельный, экономически выгодный вид сушки [3]. Это соответствует [31], где приводятся результаты экспериментальных данных по сушке резаных яблок с использованием разрядных ЭП. При этом установлена перспективность использования таких полей, поскольку интенсифицируется процесс сушки при сохранении качества продукции и уменьшении общих тепловых затрат.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Панченко М.С.* Повышение эффективности процесса сушки при использовании неоднородных электрических и магнитных полей // *Электронная обработка материалов.* 1980. № 4. С. 42–47.
2. Сильные электрические поля в технологических процессах: (Электронно–ионная технология). Сб. статей. Вып. 3. / Под ред. акад. В. И. Попкова. М., Энергия, 1979.
3. *Лыков А. В.* Прогноз развития науки о сушке капиллярно-пористых коллоидных тел // *Инженерно – физический журнал.* 1970. Т.43. № 4. С. 609–616.
4. *Казанский В. М.* Удельные теплоты испарения влаги из дисперсных тел // *ДАН СССР.* 1962. Т. 146. № 4. С. 860–864.
5. *Дущенко В.П., Панченко М.С., Бельдид В.В.* Определение удельных теплот испарения влаги из коллоидных материалов // *Известия вузов. Пищевая технология.* 1966. № 5. С 145–149.
6. *Панченко М.С., Панасюк А.Л., Мосиевич А.С. и др.* Интенсификация адсорбционно–десорбционных процессов силикагелей наложением электрических полей // *Электронная обработка материалов.* 1988. № 2. С. 32–37.
7. *Гак Е.З.* Гидродинамические эффекты в водных средах в электрических и магнитных полях // *Инженерно – физический журнал.* 1982. Т.43, №1. С. 140 – 153.
8. *Болога М. К., Руденко В. М.* Об интенсификации испарения жидкости под воздействием электрического поля // *Электронная обработка материалов.* 1975. № 3. С. 37–40.
9. *Пурмал М. Я.* Сушка ионизированным воздухом без подвода тепла к высушиваемому материалу // *Электронная обработка материалов.* 1978. № 2. С. 45–47.
10. *Еремин Е. Н.* Элементы газовой электрохимии. М., Изд-во МГУ, 1961.
11. *Ревзин И. С.* Экспериментальное исследование влияния переменного электрического тока на поверхностное натяжения жидкостей // *Электронная обработка материалов.* 1975. № 3. С. 28–30.
12. *Мунгиев В.А.* Влияние электромагнитных полей на эффект «зависания» капель жидкости над ее поверхностью // *Журнал физической химии.* 1979. Т. 53. № 10. С. 2653–2654.
13. *Хлюстова А.В., Максимов А.И.* Перенос компонентов раствора в зону плазмы в условиях тлеющего разряда атмосферного давления с электролитным катодом // *Электронная обработка материалов.* 2003. № 1. С. 44–47.
14. *Бабеня Л.А., Головейко А. Г., Новикова В. И.* Диагностика электрогазодинамических потоков слаботокового высоковольтного разряда // *Инженерно–физический журнал.* 1987. Т. 53. № 6. С. 961–966.
15. *Панченко М. С., Мосиевич А.С., Панасюк А.Л., Карпович И.Н.* Влияние электрических и магнитных полей на геометрию порового пространства и сорбционную емкость дисперсных тел // *Электронная обработка материалов.* 1976. № 6. С. 40–42.
16. *Зафрин Э. Л., Болога М. К., Бантыш Л. А., Либерман Л. Ш.* Использование тлеющего разряда для сублимационной сушки пищевых продуктов // *Электронная обработка материалов.* 1974. № 6. С. 74–76.
17. *Наремский Н. К., Монтык П. М., Кирвас А. В., Тадулев Б. А., Никульча И. П.* Применение электронно–ионной обработки воздуха в камерах созревания твердых сыров // *Электронная обработка материалов.* 1977. № 4. С. 76–77.
18. *Бабеня Л.А., Головейко А. Г., Новикова В. И. и др.* Влияние электрических полей на кинетику фазовых переходов // *Инженерно–физический журнал.* 1986. Т. 50. № 5. С. 729–735.
19. *Панченко М.С., Панасюк А.Л., Карпович И. М., Кисельчук Н. Л.* Кинетика сушки капиллярно–пористого тела в электрическом поле // *Инженерно–физический журнал.* 1977. Т. 33. № 2. С. 356–357.
20. *Панасюк А. Л., Панченко М. С., Старов В. М., Чураев Н. В.* Влияние неоднородного электрического и магнитного поля на внутренний массоперенос в капиллярнопористых телах // *Инженерно–физический журнал.* 1978. Т. 35. № 1. С. 93–100.
21. *Лазаренко Б. Р., Дураджди В. Н., Факторович А. А., Брянцев И. В.* Исследование пробоя между металлическим и электролитным электродами // *Электронная обработка материалов.* 1970. № 4. С. 18–21.
22. *Дураджди В. И.* Экспериментальное исследование канала искрового разряда между металлическим и электролитным электродами // *Электронная обработка материалов.* 1971. № 2. С. 44–46.
23. *Лазаренко Б. Р., Лазаренко Н. И.* Механизм прохождения электрического тока через электролит // *Электронная обработка материалов.* 1979, №1. С. 5 – 11.
24. *Дураджди В.Н.* Об электрическом импульсном разряде между металлическим и электролитным электродами // *Электронная обработка материалов.* 2001. № 3. С. 22–26.

25. Гросу Ф. П., Болога М. К. Электроконвективные явления и интенсификация теплообмена // Электронная обработка материалов. 1977. № 5. С. 51–62.
26. Болога М. К., Васильев Л. Л., Кожухарь И. А., Шкилев В. Д. Влияние электрического поля на характеристики тепловых труб // Инженерно – физический журнал. Т. 36. № 6. С. 1126–1137.
27. Полищук Н. В., Панченко И. М., Панченко М. С. Эффекты воздействия и последствия электрических полей на поднятие воды в макрокапиллярах // Электронная обработка материалов. 2002. № 4. С. 54–67.
28. Панченко М. С., Панченко И. М., Панасюк А. Л., Мосиевич А. С., Карнович И. М. Повышение эффективности работы промышленных адсорберов путем продления срока эксплуатации адсорбентов в электрическом поле // Электронная обработка материалов. 1995. № 1. С. 39–42.
29. Иванов Л. Д., Болога М. К., Громацкий В. В. Исследование периода падающей скорости сушки с учетом зависимости связи влаги с материалом в СВЧ поле // Электронная обработка материалов. 1989. № 3. С. 34–36.
30. Лазаренко Б. Р., Лазаренко Н. И. Изыскание новых применений электричества // Электронная обработка материалов. 1977. № 5. С. 5–19.
31. Панченко М. С., Панасюк А. Л., Мосиевич А. С., Мороз Г. А. Использование барьерного разряда для энергоподвода при сушке резаных яблок // Электронная обработка материалов. 1989. № 3. С. 34–36.

Поступила 19.01.05

Summary

The energogrammes and velocity curves of silicagel KCK-2 sample drying in strong non-uniform electric fields, including the fields of crown and spark discharge are shown. Equation of drying process heat balance in the conditions of inner and external heat sources (electric heater and gas discharge) presence and the equation for specific heat evaporation of free and combined water determination are adduced. The mechanism of physical processes directed to decreasing of phase transition with isothermal drying of capillary porous sample in crown and spark discharge is offered. This process is confirmed by the experiment on the electrocalorimetric plant.

ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА БИОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ И ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ

А.А. Зубенко, Л.В. Зубенко, В.И. Андреева, А.Н. Ющишина

ОБЕЗЗАРАЖИВАНИЕ ВОДЫ В ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНЫХ РЕАКТОРАХ С МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ЗАГРУЗКОЙ

*Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины,
пр. Октябрьский, 43-А, г. Николаев, 54018, Украина*

Введение

Работа является продолжением исследований по применению электроимпульсного метода для очистки воды.

В двух предыдущих работах [1, 2] приведены результаты исследований свойств электроразрядного гидроксида алюминия, полученного при пропускании импульсных токов через слой металлических частиц, и данные по очистке хромосодержащих стоков в электроразрядных реакторах с металлической загрузкой. В [2] показана возможность полной очистки стоков от ионов хрома, причем удельные энергозатраты в этом методе очистки более чем в 2 раза ниже, чем при использовании электрокоагуляторов. Очистка происходит следующим образом. При пропускании через слой железных частиц сильноточных импульсов в воду попадают как ионы железа (II, III), так и мелкодисперсные частицы металла [3, 4]. Последние, реагируя с водой, превращаются в гидроксид железа. Ионы шестивалентного хрома, содержащиеся в гальваностоках, восстанавливаются до Cr^{3+} и адсорбируются поверхностью гидроксидов железа с образованием нерастворимых соединений хрома (III).

В литературе имеются сведения о применении электроимпульсного метода обработки воды с целью обеззараживания. В [5] В.Ф. Левченко приводит результаты по обеззараживанию воды при обработке в слое гранулированного металла импульсными токами. Процесс обеззараживания состоит в электроимпульсном разрушении содержащихся в воде бактериальных загрязнений, а также в разрушении ее молекул с образованием химически активных частиц, нейтрализации загрязнения за счет окислительно-восстановительных реакций и последующем извлечении их из воды в результате адсорбции гидроксидами металла. При этом затраты энергии на обеззараживание воды поверхностных водоемов зависят от исходной степени загрязнения и в среднем составляют от 0,2 до 0,5 кВт·ч/м³.

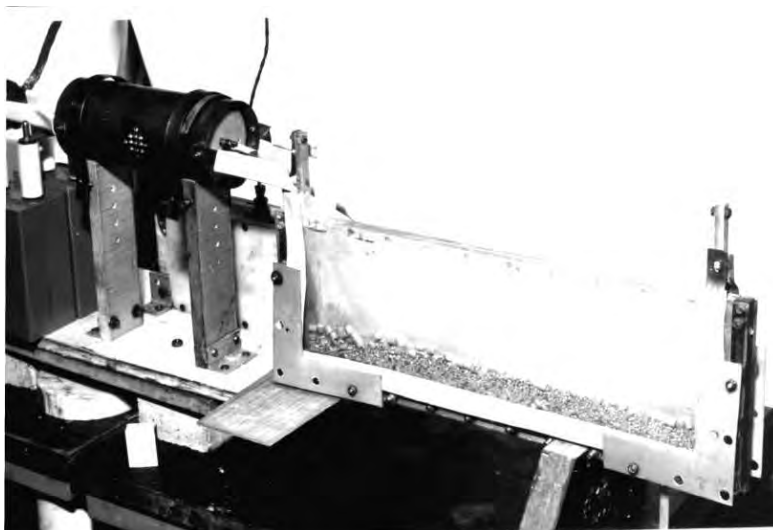
Как видно из изложенного, процесс обеззараживания воды от бактериальных загрязнений отличается от процесса ее очистки от хрома тем, что в этом случае действуют дополнительные факторы, сопровождающие электрический разряд в воде, такие, например, как гидродинамические явления, которые разрушают бактерии.

В.Ф. Левченко в своих экспериментах использует электрические разряды низких напряжений до 1 кВ [5, 6]. На наш взгляд, в этих условиях разрушение бактерий происходит с невысокой интенсивностью.

Цель работы состояла в исследовании эффективности применения высоковольтных электрических разрядов для обеззараживания воды электроимпульсным методом. Полученные при этом результаты подтверждают, что использование высоковольтных электрических разрядов позволяет не только эффективнее проводить процесс обеззараживания воды, но и очищать ее с более высокой исходной степенью бактериального загрязнения.

Методика эксперимента

Исследования проводились на лабораторной установке (см. рисунок), состоящей из: генератора импульсных токов, скомпонованного по традиционной схеме и включающего разрядное устройство, емкостный накопитель (конденсатор К75-29А), воздушный тригatronный разрядник, блок поджига; реактора с металлозагрузкой; цепи измерения электрических характеристик, состоящей из коаксиального шунта (сопротивление $2,5 \cdot 10^{-3}$ Ом) и осциллографа С9-8А.



Внешний вид электроразрядного реактора с металлической загрузкой

Реактор представлял емкость прямоугольной формы с прозрачными боковыми стенками. Внутренние размеры реактора, мм – 520×40×200. По торцам емкости располагались электроды, изготовленные из алюминиевого сплава АМг-5. Между электродами насыпали слой металлозагрузки высотой приблизительно 30 мм, которая представляла собой металлические гранулы длиной 5 мм, нарубленные из алюминиевой проволоки диаметром 4 мм. Масса металлозагрузки составляла около 0,7 кг. Объем обрабатываемой воды равнялся 0,35 л, а ее уровень в реакторе превышал высоту слоя металлозагрузки приблизительно на 5 мм.

Генератор импульсных токов имел следующие электрофизические параметры: начальное напряжение конденсаторной батареи $U = 20$ кВ; емкость конденсаторной батареи $C = 0,0125$ мкФ; частота следования электрических импульсов $f = 2$ Гц. Вода для обработки набиралась в стерилизованную посуду из поверхностного источника и имела следующие исходные показатели бактериального загрязнения: коли-индекс – 37000; микробное число – 21600. Непосредственно перед экспериментом разрядная камера обрабатывалась раствором хлорной извести (содержание активного хлора 10 мг/л) в течение 0,5 часа, затем промывалась свежей дистиллированной водой. После обработки воду сливали в стерильные емкости, где завершался процесс коагуляции и происходило осаждение основной доли твердой фазы. После завершения осаждения жидкую фазу отфильтровывали с использованием стерильного бумажного фильтра. Определение коли-индекса в фильтрате определяли методом мембранных фильтров, а микробное число – по стандартной методике (ГОСТ 18963-73).

Результаты и обсуждение

Режимы обработки и результаты проведенных исследований представлены в таблице.

Результаты экспериментов по обеззараживанию воды

U , кВ	C , мкФ	E , Дж	n , имп	E_{Σ} , кДж	V , л	ΔAl^{3+} , мг/л	$E_{уд}$, кВт·ч/м ³	Коли-индекс	Микробное число
Обработка высоковольтными электрическими разрядами									
Исходная вода								37000	22000
20	0,0125	2,5	50	0,125	0,35	18	0,1	450	1400
20	0,0125	2,5	75	0,188	0,35	24	0,15	110	170
20	0,0125	2,5	100	0,25	0,35	36	0,2	≤ 3	12
Обработка низковольтными электрическими разрядами по [5]									
0,6							0,2	≤ 3	100
Нормы ПДК								≤ 3	≤ 100

Как видно из таблицы, обеззараживание воды с исходным загрязнением по коли-индексу 37000 и микробному числу 21600 до норм ПДК происходит при обработке удельной энергией, равной 0,2 кВт·ч/м³. При этом удельный расход алюминия составляет 36 г/м³.

По данным работы [5], при обработке воды такой же удельной энергией обеззараживание ее до норм ПДК возможно при исходном бактериальном загрязнении на порядок ниже (коли-индекс равен 1000, а микробное число – 6000).

Таким образом, данные работы свидетельствуют о преимуществах использования высоковольтного импульсного разряда для обеззараживания воды с высоким исходным бактериальным загрязнением.

Заключение

Использование электроимпульсной технологии очистки воды электрическими разрядами более высокого напряжения (20 кВ вместо 600 В) позволяет при одинаковых энергозатратах обеззараживать воду с показателями бактериального загрязнения на порядок выше.

Обозначения

U – начальное напряжение емкостного накопителя, кВ; C – емкость накопителя, мкФ; E – запасаемая энергия одиночного импульса, Дж; n – количество импульсов в цикле обработки воды, кДж; E_{Σ} – суммарная энергия в цикле обработки воды, кДж; V – объем обрабатываемой воды, л; ΔAl^{3+} – расход металлозагрузки (алюминия), мг/л; $E_{уд}$ – удельные затраты электрической энергии на обработку воды, кВт·ч/м³.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Зубенко А.А., Ющишина А.Н.* Исследование свойств электроразрядного гидроксида алюминия // *Электронная обработка материалов*. 2001. № 6. С.60–65.
2. *Зубенко А.А., Ющишина А.Н.* Очистка хромсодержащих стоков в электроразрядных реакторах с металлической загрузкой // *Электронная обработка материалов*. 2002. № 4. С. 77–79.
3. *Фоминский Л.П.* Некоторые аспекты электроэрозионного способа получения окиси алюминия // *Электронная обработка материалов*. 1980. № 1. С.45–48.
4. *Ладиков-Роев Ю.П., Ткаченко В.Ф., Левченко В.Ф.* Исследование электрической эрозии и диспергирования материалов в среде при разрядно-импульсных технологиях // *Электрический разряд в жидкости и его применение в промышленности*. Ч. 2. Николаев, 1988. С. 206.
5. *Левченко В.Ф.* Электроимпульсный метод комплексной переработки матеріалів // *Проблеми машинобудування НАН України*. Вип. 38. Киев, 1992. С. 78–86.
6. *Шевченко В.Ф., Сергеенков В.П., Тютюник М.С.* Опытнo-промышленный реактор очистки воды по электроимпульсной технологии // *Электрический разряд в жидкости и его применение в промышленности*. Ч. 2. Николаев, 1988. С. 227.

Поступила 18.01.05

Summary

The results of researches on the surface water sources disinfection using an electroimpulse method are presented. The process of water disinfection involves electroimpulse destruction of the bacterial pollutions and their extraction by metal hydroxides. It is shown that the use of the high-voltage electric discharges in place of the low-voltage ones allows to disinfect water with bacterial pollutions indexes of an order of magnitude higher at the equal specific costs.

ИЗ ОПЫТА РАБОТЫ

М.А. Гасанов, А.М. Гашимов, В.А. Алиев, К.Б. Гурбанов

АДСОРБЦИОННАЯ ОЧИСТКА ПОДЗЕМНЫХ ВОД ОТ ЖЕЛЕЗА И МАРГАНЦА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВОЗДЕЙСТВИЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РАЗРЯДОВ

*Институт Физики НАН Азербайджана,
пр. Г. Джавида 33, г. Баку, Аз.1143, Азербайджан*

В последние годы в мировой практике ужесточены требования к содержанию железа и марганца в питьевой воде.

Подземные воды обычно содержат несколько десятков химических элементов и соединений. Однако чаще всего препятствует использованию подземных вод в целях питьевого и промышленного водоснабжения наличие в ней повышенного содержания ионов железа, марганца, фтора, а также сероводорода. По рекомендации Всемирной организации здравоохранения и требованиям ГОСТа 2874-82 «Вода питьевая» концентрация железа и марганца в воде питьевого качества не должна превышать значений 0,3 и 0,1 мг/л соответственно [1]. Подземные воды, как правило, содержат железо от 1 до 5 мг/л, но встречаются источники подземной воды с содержанием железа до 20 мг/л [2]. В подземной воде, лишенной кислорода, железо обычно находится в форме раствора бикарбоната железа, частично гидролизованного.

Существующие методы обезжелезивания подземных вод обсуждены в работах [3–7], где показано, что в процессе удаления железа из воды основное внимание уделялось действительно важным вопросам окисления двухвалентного железа кислородом воздуха в процессе аэрации воды.

К. Холле [6], выполнивший на артезианских скважинах полупроизводственные эксперименты по обезжелезиванию воды без предварительного окисления двухвалентного железа, пришел к выводу, что с уменьшением значений рН процесс обезжелезивания на фильтрах улучшается.

Повышенное содержание в воде марганца отрицательно сказывается на здоровье человека [2].

Марганец в природных водах существует в виде различных соединений. В подземных водах марганец находится преимущественно в форме бикарбоната двухвалентного марганца $Mn(HCO_3)_2$, хорошо растворимого в воде. Концентрация марганца в подземных водах колеблется обычно от 0,5 до 2–3 мг/л. В отличие от железа, двухвалентный марганец, содержащийся в подземных водах, чрезвычайно медленно окисляется кислородом воздуха до малорастворимых соединений трех- и четырехвалентного марганца при рН = 8. Лишь после повышения рН до 9,5 можно добиться заметного увеличения скорости окисления $Mn(II) \rightarrow Mn(III)$. Хлор при рН = 7 практически не окисляет $Mn(II)$ [5]. Скорость окисления двухвалентного марганца в воде в значительной степени зависит от уровня рН воды. При рН ≤ 8 окисления Mn^{3+} практически не происходит. Достаточно быстрое окисление Mn^{2+} происходит при рН $> 9,5$. Таким образом, удаление марганца из воды представляет собой более сложную задачу по сравнению с удалением железа.

Способы обработки воды включают хорошо известные процессы, такие, как коагуляция, флокуляция, отстаивание, обработка воды перманганатом калия, удаление марганца аэрацией с подщелачиванием, фильтрование воды через марганцевый песок или марганцевый катионит, окисление озоном, хлором или двуокисью хлора, фильтрование, и показана перспективность применения в качестве фильтрующих материалов природных и модифицированных адсорбентов [7–10].

Из анализа научно-технической литературы по очистке подземных вод можно заключить:

– при рН $< 8,5$ без катализатора окисления двухвалентного марганца практически не происходит;

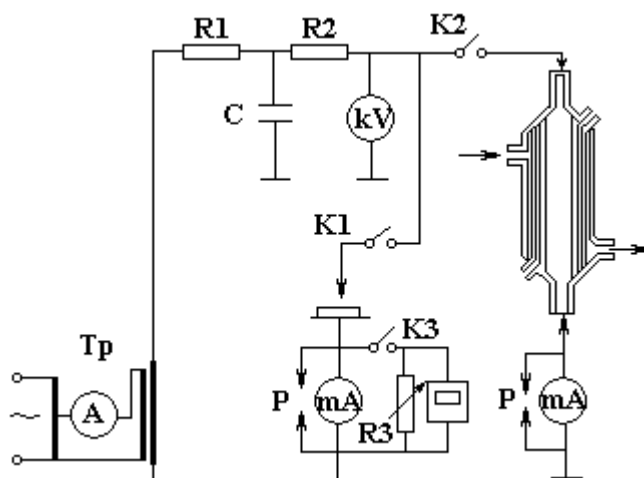
- при $pH < 8$ обезжелезивание на фильтрах улучшается;
- для очистки подземных вод от железа и марганца требуется 8–12 часов;
- озон и двуокись хлора являются сильными и эффективными окислителями, однако их использование осуществляется с применением сложной технологической схемы и поэтому в практике водоподготовки для очистки воды от марганца и железа не нашло применения. Из применяемых на практике методов очистки воды адсорбционные методы с использованием твердых адсорбентов обладают некоторыми преимуществами.

Адсорбционные процессы очистки воды широко используются в химической промышленности и других отраслях техники. Перспективность адсорбционного метода, потребности практики требуют изучения возможностей дальнейшей интенсификации адсорбционных процессов, создания средств управления ими в ходе проведения технологических операций. Одним из таких средств управления является воздействие на протекание адсорбционного процесса электрических разрядов. Эффективность воздействия электрического разряда на адсорбционные процессы определяется не только возможностью управления, но и другими преимуществами, которыми обладает электрический разряд: возможностью прямого вмешательства в протекание адсорбционного процесса, малой энергоемкостью, экономичностью, технологичностью [11–17].

В представленной работе применялся адсорбционный способ одновременной очистки подземных вод от железа и марганца с использованием воздействия электрических разрядов.

Адсорбентом служил природный цеолит–клиноптилолит марки $(Na_2K_2)_{10}Al_2O_3 \cdot 10SiO_2$ Товузского месторождения (Азербайджан). Природные цеолиты представляют собой сравнительно дешевые и доступные микропористые тела, которые находят все возрастающее применение на практике. Клиноптилолит находит широкое применение для очистки природных вод взамен кварцевого песка [6] и обладает более развитой поверхностью, межзерновой пористостью и важной способностью к катионному обмену [11]. В экспериментах клиноптилолит предварительно подвергался термообработке с вакуумированием при температуре $T = 800^\circ C$ в течение 5 часов.

Принципиальная электрическая схема обработки материалов электрическим разрядом барьерного типа представлена на рисунке.



Принципиальная электрическая схема обработки материалов в электрическом разряде барьерного типа

Основным узлом установки является адсорбер с адсорбентом, через который пропускалась очищаемая фракция воды.

Предварительная разрядная электрообработка адсорбентов проводилась в следующих режимах: величина приложенного напряжения 17 кВ, средний ток 80 мкА. Результаты очистки подземных вод от железа и марганца природным клиноптилолитом после предварительной обработки приведены в таблице. Образцы № 1 представляют исходную воду, № 2 – воду, очищенную с использованием клиноптилолита, образцы № 3 – воду, очищенную с использованием клиноптилолита, предварительно подвергнутого воздействию электрическим разрядом барьерного вида.

Из таблицы видно, что клиноптилолит, подвергнутый предварительной электроразрядной обработке, позволяет получить устойчивый эффект полной и одновременной деманганации и обезжелезивания.

Таким образом, результаты проведенных исследований свидетельствуют о том, что представляется возможность методами адсорбции снизить количество железа и марганца в подземной воде до значений, нормированных ГОСТом.

Результаты химического анализа проб подземной воды

№ п/п	Показатель	Единица измерения	ГОСТ 2874-82	Состав		
				№ 1	№ 2	№ 3
1	Температура	°С		0	0	0
2	Запах при 20°С	бал	0	0	0	0
3	Запах при 60°С	бал	2	0	0	0
4	Привкус	бал	2	0	0	0
5	Цветность	градус	20 (35)	2,40	2,40	2,40
6	Взвешенные частицы	мг/л	1,5 (2,0)	2,95	2,25	1,90
7	рН	–	6–9	7,55	7,30	7,05
8	Соли аммония (N–NH ₄)	мг/л	2,0	1,24	1,19	1,05
9	Гидрокарбонат (НСО ₃)		–	183	109,3	64,1
10	Железо (Fe)	“_”	0,3 (1)	0,83	0,33	0,05
11	Кальций (Са)	“_”		69,1	67,1	65,1
12	Магний (Mg)	“_”		28,6	26,1	24,7
13	Марганец (Mn)	“_”	0,1(0,5)	1,2	0,8	0,1
14	Минерализация (Σи)	“_”		666,9	623,8	596,6
15	Натрий+калий (Na+K)	“_”	200 (Na)	92,1	86	84,3
16	Нитраты (NO ₃ ⁻)	“_”	45	13,80	5,87	5,70
17	Нитриты (NO ₂ ⁻)	“_”	3	0,013	0,003	0,001
18	Жесткость	мг·экв/л	7 (10)	5,8	5,6	5,4
19	Жесткость карбонатная	ммол/л		3,0	1,8	1,05
20	Сульфиды (SO ₄ ²⁻)	мг/л	500	290,6	267,1	221,0
21	Сухой остаток	“_”	1000 (500)	574	568	564
22	Хлориды (Cl ⁻)	“_”	350	591	591	591
23	Электропроводимость	мкС/см	1500	572	566	563

Технология применения описанного метода для обезжелезивания и полной деманганации подземных вод разработана и проверена в реальных условиях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Information of Ground Water Associates // Water Works Assoc – 1984-76. № 11. P. 67–68, 92
2. Зарубин Г.П., Новиков Ю.В. Современные методы очистки и обеззараживания питьевой воды. М., 1976.
3. Николадзе Р.И. Обезжелезивание природных и оборотных вод. М., 1978.
4. Станковичус В.И. Обезжелезивание воды фильтрованием. Вильнюс, 1978.
5. Золотова Е.Ф., Асс Г.Ю. Очистка воды от железа, фтора, марганца и сероводорода. М., 1975.
6. Hallek Beitrag zur Filtration eisenhaltigen Grun-Wasser. Wasserwirtsch afz. Wasser technik. № 12. 1964.
7. Асс Г.Ю. Выбор обезжелезивания воды по величине окислительно-восстановительного потенциала // Водоснабжение и санитарная техника. № 10. 1969.
8. Клячко В.А., Апельцин И.Э. Очистка природных вод. М., 1971.
9. Апельцин И.Э., Золотова Е.Ф. Очистка воды от марганца обработкой перманганатом калия // Труды ВНИИ ВОД ГЕО. М., 1974.
10. Апельцин И.Э., Золотова Е.Ф., Макаренко З.И. Технология применения перманганата калия при очистке воды // Жилищное и коммунальное хозяйство. № 9. 1974.
11. Гашимов А.М., Гурбанов К.В., Гасанов М.А., Закиева И.Г. Применение новых электрофизических методов в процессах очистки промышленных сточных вод // Изв. НАН Азербайджана, сер. физ. мат. и техн. наук. Физика и Астрономия. № 3. 2004. С. 81–83.
12. Халилов Э.Н., Багиров Р.А. Природные цеолиты, их свойства, производство и применение. Баку-Берлин, 2002.
13. Ерматов С.Е. Радиационно-стимулированная адсорбция. Алма-Ата, 1973.

14. Джужварлы Ч.М., Дмитриев Е.В. и др. Образование заряженного состояния в силикагелях под воздействием электрических полей и разрядов // Электронная обработка материалов. № 4. 1991. С. 46–47.
15. Гасанов М.А. Влияние электрических полей и разрядов на процессы сорбции в системе «жидкость–адсорбент». Автореф. дис. канд. физ.мат. наук. Баку, 1992.
17. Hashimov A.M., Aliyev V.A., Mehdizadeh R.N., Hasanov M.A., Zakiyeva I.H. Clearing of industrial sewage with use of electric discharges effect. II International Conference: Technical & Physical Problems in Power Engineering, 6-8 September 2004, Tabriz, Iran, P. 461–462.
18. Гасанов М.А. Третичная очистка сточных вод при воздействии электрическим разрядом // Проблемы энергетики. № 3. Баку, 2004. С. 58–61.

Поступила 17.01.05

Summary

In this paper the results of the investigation of the refining process of underground waters from iron and manganese with the use of electric-discharge action are given. It is shown that the application of the electric-discharge action of the barrier type essentially increases the efficiency of the adsorption refining of underground waters. The presented method is perspective technology of the refining of underground waters from iron and manganese.

Т.Д. Денисюк, А.Р. Ризун

ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНАЯ ОЧИСТКА ТОЧНОГО ЛИТЬЯ

*Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины,
пр. Октябрьский, 43-А, г. Николаев, 54018, Украина*

Электроразрядная очистка (ЭРО) в активных средах широко внедрена в литейном производстве мелкого, среднего и крупногабаритного литья [1]. ЭРО точного тонкостенного (с толщиной стенки < 8 мм) литья применяется нешироко из-за того, что для производства таких заготовок используются литейные формы и стержни из высокопрочных материалов, прочность на сжатие которых достигает порядка 10 МПа и выше, и для их разрушения требуется энергия $E \leq 5$ кДж, являющаяся критической для точных литых заготовок.

Экспериментально установлена (табл. 1, рис. 1) зависимость критических энергий ЭРО от толщины стенок точного литья из стальных, чугуновых и алюминиевых сплавов. Эта зависимость может служить ориентиром для расчета энергий ЭРО. Анализ полученных значений показывает, что использовать ЭРО для тонкостенного литья, полученного в оболочковых, керамических и других высокопрочных формах и стержнях, возможно только в том случае, если энергия импульсного нагружения при разрушении форм и стержней не превышает прочности самой отливки. Поэтому в большинстве случаев используются механические способы очистки точного литья, состоящие из большого объема ручного труда, и экологически вредные жидкости (кислоты и щелочи) для разупрочнения формовочных материалов.

Цель работы – изучение возможностей снижения прочности форм и стержней с использованием ЭРО в активных разрядных средах на основе поверхностно-активных веществ (ПАВ) и исключения вредных воздействий на материал отливки.

В качестве активной среды служил раствор адипиновой кислоты, относящейся к классу ПАВ-диспергаторов [2]. Показателем активности среды является величина, характеризующаяся отношением ее поверхностного натяжения к оптимальной концентрации в растворе ПАВ. Максимально возможная активность экспериментально установлена при 30% водном растворе адипиновой кислоты.

14. Джужварлы Ч.М., Дмитриев Е.В. и др. Образование заряженного состояния в силикагелях под воздействием электрических полей и разрядов // Электронная обработка материалов. № 4. 1991. С. 46–47.
15. Гасанов М.А. Влияние электрических полей и разрядов на процессы сорбции в системе «жидкость–адсорбент». Автореф. дис. канд. физ.мат. наук. Баку, 1992.
17. Hashimov A.M., Aliyev V.A., Mehdizadeh R.N., Hasanov M.A., Zakiyeva I.H. Clearing of industrial sewage with use of electric discharges effect. II International Conference: Technical & Physical Problems in Power Engineering, 6-8 September 2004, Tabriz, Iran, P. 461–462.
18. Гасанов М.А. Третичная очистка сточных вод при воздействии электрическим разрядом // Проблемы энергетики. № 3. Баку, 2004. С. 58–61.

Поступила 17.01.05

Summary

In this paper the results of the investigation of the refining process of underground waters from iron and manganese with the use of electric-discharge action are given. It is shown that the application of the electric-discharge action of the barrier type essentially increases the efficiency of the adsorption refining of underground waters. The presented method is perspective technology of the refining of underground waters from iron and manganese.

Т.Д. Денисюк, А.Р. Ризун

ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНАЯ ОЧИСТКА ТОЧНОГО ЛИТЬЯ

*Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины,
пр. Октябрьский, 43-А, г. Николаев, 54018, Украина*

Электроразрядная очистка (ЭРО) в активных средах широко внедрена в литейном производстве мелкого, среднего и крупногабаритного литья [1]. ЭРО точного тонкостенного (с толщиной стенки < 8 мм) литья применяется нешироко из-за того, что для производства таких заготовок используются литейные формы и стержни из высокопрочных материалов, прочность на сжатие которых достигает порядка 10 МПа и выше, и для их разрушения требуется энергия $E \leq 5$ кДж, являющаяся критической для точных литых заготовок.

Экспериментально установлена (табл. 1, рис. 1) зависимость критических энергий ЭРО от толщины стенок точного литья из стальных, чугуновых и алюминиевых сплавов. Эта зависимость может служить ориентиром для расчета энергий ЭРО. Анализ полученных значений показывает, что использовать ЭРО для тонкостенного литья, полученного в оболочковых, керамических и других высокопрочных формах и стержнях, возможно только в том случае, если энергия импульсного нагружения при разрушении форм и стержней не превышает прочности самой отливки. Поэтому в большинстве случаев используются механические способы очистки точного литья, состоящие из большого объема ручного труда, и экологически вредные жидкости (кислоты и щелочи) для разупрочнения формовочных материалов.

Цель работы – изучение возможностей снижения прочности форм и стержней с использованием ЭРО в активных разрядных средах на основе поверхностно-активных веществ (ПАВ) и исключения вредных воздействий на материал отливки.

В качестве активной среды служил раствор адипиновой кислоты, относящейся к классу ПАВ-диспергаторов [2]. Показателем активности среды является величина, характеризующаяся отношением ее поверхностного натяжения к оптимальной концентрации в растворе ПАВ. Максимально возможная активность экспериментально установлена при 30% водном растворе адипиновой кислоты.

Коэффициент поверхностного натяжения среды устанавливался по показателю смачиваемости поверхности формовочных смесей, и по сравнению с водой он в два раза ниже, то есть равен примерно 36 эрг/см^2 . Поскольку молекулы адипиновой кислоты (химическая формула $(\text{CH}_2)_4(\text{COOH})_2$) дефильны, состоят из полярной $(\text{COOH})_2$ и неполярной $(\text{CH}_2)_4$ частей, механизм разупрочнения формовочных смесей можно характеризовать адсорбционными явлениями, происходящими на границе полярных тел – формовочной керамической смеси SiO_2 и раствора с полярной составляющей.

Таблица 1. Зависимость допустимых значений энергии разрядов от толщины стенок литых заготовок

Запасенная энергия W , кДж	0,625	1,25	2,5	5,0	10,0
Толщина стенок литья из Ст 45, мм	2,0	3,5	7,0	15,0	25,0
Толщина стенок литья из Сч 28-48, мм	4,0	5,0	11,0	17,0	25,0
Толщина стенок литья из А1 6, мм	6,0	11,0	20,0	–	–

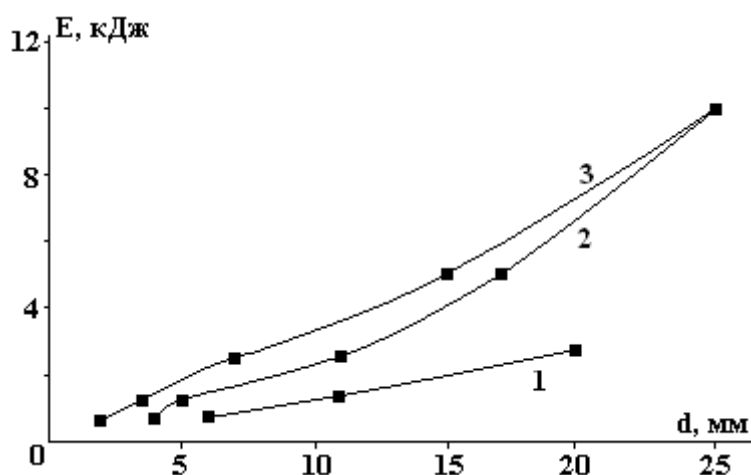


Рис. 1. Зависимость допустимых значений энергии разрядов от толщины стенок литых заготовок. 1 – отливка Ст 45; 2 – отливка Сч 28-48; 3 – отливка А1 6

Полярной частью молекула адипиновой кислоты ориентируется к поверхности форм и стержней. Подвижность молекул адипиновой кислоты примерно в два раза выше подвижности молекул воды, которые значительно глубже проникают в микротрещины формовочных смесей, образовавшихся во время спекания форм и стержней, и стремятся их раздвинуть до критических размеров. В процессе ЭРО растет температура активной разрядной среды, и адсорбционные явления значительно активизируются. Их максимальная активность, как показали эксперименты, наступает при температуре среды 60°C .

В качестве опытного образца точного литья использована отливка из Ст 45 корпуса навесного замка, полученная в керамической литейной форме, имеющая стержень $d = 8 \text{ мм}$ и минимальную толщину стенок (10 мм). Прочность керамического стержня на сжатие – 12 МПа. Для разрушения стержня требуется энергия порядка 5 кДж [3], а это возможно для отливок с минимальной толщиной стенок (рис. 1) не меньше 15 мм.

ЭРО опытной отливки проводилась энергией порядка 2,5 кДж, недостаток энергии разрушения восполнялся за счет активности разрядной среды. В табл. 2 и на рис. 2 представлена зависимость полноты очистки опытной отливки от времени ЭРО в активной разрядной среде – 30% водном растворе ПАВ – адипиновой кислоты при температуре 60°C . Для сравнения даны результаты экспериментальной ЭРО опытной отливки в водной разрядной среде разрядами с теми же параметрами. Полнота очистки определялась путем взвешивания выбитого стержня в процентном отношении к первоначальному весу.

Таким образом, с помощью активных разрядных сред на основе ПАВ-диспергаторов показана возможность более эффективной ЭРО точного литья.

Показатель полноты очистки опытной отливки при ЭРО в активной среде в 2 раза выше, чем при ЭРО в водной. С учетом того, что ПАВ значительно проще утилизировать, чем щелочи и неорганические кислоты, которые при использовании для разупрочнения наносят вред не только окружаю-

щей среде, но и оборудованию, появляется возможность использования не только активной среды, но и ЭРО в комплексе для очистки как литья, так и оборудования от вредных, нежелательных лакокрасочных и других высокопрочных покрытий.

Таблица 2. Результаты ЭРО опытной отливки в водной и активной разрядных средах

№ опыта	Энергия, кДж	Частота разряда, Гц	Время ЭРО, с	Полнота ЭРО, %	
				Водная среда	Активная среда
1	2,5	2	60	20	34
2	2,5	2	120	31	65
3	2,5	2	180	40	75
4	2,5	2	240	44	82
5	2,5	2	300	48	95

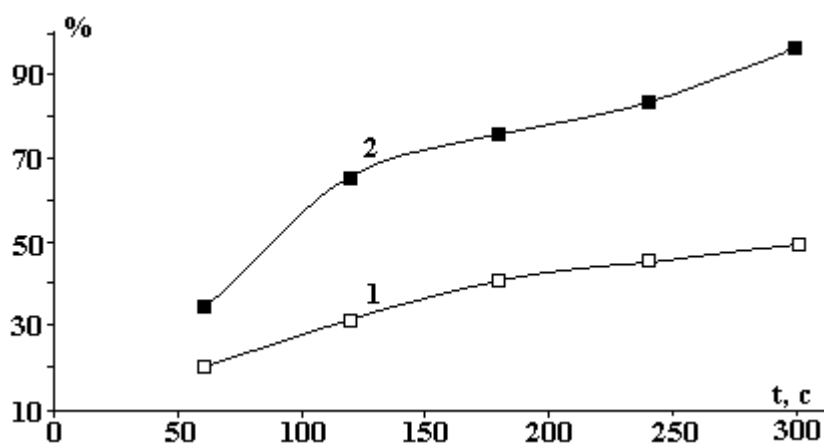


Рис. 2. Зависимость полноты очистки отливки от времени ЭРО при температуре разрядной среды 60°C. 1 – активная среда; 2 – водная среда

Полученные результаты являются отправной точкой в расширении возможностей ЭРО. Для разработки технологических принципов очистки точного литья необходимо проведение исследований на конкретных типах отливок из материалов разной сложности для прочностных характеристик форм и стержней.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ризун А.Р. Исследование и оптимизация технологии электрогидроимпульсной выбивки стержней и очистки отливок. Дис. канд.техн.наук: 30.09.1983. Киев, 1984.
2. Абрамзон А.А. Поверхностно-активные вещества: Свойства и применение. Л., 1981.
3. Методика расчета гидродинамических и электрических характеристик канала разряда электрогидравлических установок / АН УССР. Проектно-конструкторское бюро электрогидравлики; Сост. А.Р.Ризун, В.В. Иванов, О.М. Рыбка. Киев, 1982.

Поступила 09.12.04

Summary

The results of experimental researches of the complex application of the electrodischarge and active discharging media on the basis of the surface-active agents, providing expansion of opportunities of electrodischarge techniques of purification both castings and the equipment from undesirable coatings are presented.

ЛАЗЕРНАЯ ПАЙКА И МИКРОСВАРКА ИЗДЕЛИЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
ул. П.Бровки, 6, г. Минск, 220013, Республика Беларусь*

Воздействие лазерным излучением в виде сфокусированного луча создает высокую концентрацию энергии (10^8 – 10^9 Вт/см²) на поверхности материалов, что обеспечивает локальный нагрев с высокой скоростью и незначительной зоной термического влияния. Проблемы формирования микросоединений при лазерном воздействии связаны с необходимостью определения плотности мощности излучения, выбора оптимальных режимов, обеспечения заданного качества соединений. Энергетический баланс лазерного воздействия описывается уравнениями [1]:

$$E_{\text{л}} = E_{\text{погл}} + E_{\text{отр}}, \quad E_{\text{погл}} = E_{\text{ж}} + E_{\text{т}}, \quad (1)$$

где $E_{\text{л}}$ – энергия лазерного луча в зоне обработки; $E_{\text{погл}}$ – энергия, поглощенная в процессе фотонно-электронных соударений; $E_{\text{отр}}$ – энергия, отраженная от поверхности; $E_{\text{ж}}$ – полное теплосодержание расплавленного металла; $E_{\text{т}}$ – энергия, отводимая теплопроводностью в глубь основного металла.

Интенсивность лазерного излучения, проникающего в материал, убывает по экспоненциальному закону:

$$I(x) = I_0 k \cdot e^{-\gamma \cdot x}, \quad (2)$$

где x – глубина проникновения, I_0 – интенсивность лазерного излучения на поверхности, k – коэффициент поглощения, γ – степень поглощения.

В металлах кванты света поглощаются в основном электронами проводимости, которые рассеивают поглощенную энергию на тепловые колебания решетки за время 10^{-11} – 10^{-10} с, благодаря чему поглощенная энергия быстро переходит в теплоту. Степень поглощения для металлов порядка 10^7 м⁻¹, поэтому энергия выделяется в слое толщиной около 10^{-7} м и лазерное излучение можно рассматривать как локальный источник тепловой энергии на поверхности. Размер нагретой зоны на первом этапе определяется глубиной проникновения излучения в среду, а затем растет за счет теплопроводности. С ростом температуры поверхности значение коэффициента поглощения увеличивается и составляет для металлов при температуре 500°C и длине волны излучения 1,06 мкм 0,35–0,40, что дает возможность нагревать их поверхность с возрастающей скоростью.

При импульсно-периодическом лазерном воздействии процесс нагрева тела описывается непрерывно действующим источником теплоты, который представляется в виде серии действующих друг за другом мгновенных источников теплоты. Количество теплоты, введенное в обрабатываемую поверхность за время t , равно

$$Q = \int_0^{\tau_{\text{и}}} \eta P(t) dt, \quad (3)$$

где $\tau_{\text{и}}$ – длительность импульса, η – КПД лазерного нагрева; P – мощность лазерного излучения.

Плотность мощности лазерного воздействия зависит в значительной степени от диаметра луча d :

$$E = \frac{4W}{\pi \cdot d^2 \cdot \tau_{\text{и}}}, \quad (4)$$

где W – энергия в импульсе, которая для плавления материала без выплеска равна

$$W = \frac{0,885 T_{\text{пл}} \cdot \lambda \cdot \pi \cdot r^2}{\sqrt{a \cdot \tau_{\text{и}}}}, \quad (5)$$

где $T_{пл}$ – температура плавления материала; λ – коэффициент теплопроводности; $a = \lambda / c\gamma$ – коэффициент температуропроводности ($c\gamma$ – объемная теплоемкость); r – радиус пучка лазерного излучения.

Для импульсного лазерного источника энергия W находится в пределах 10^2 – 10^3 Дж. Теоретически рассчитана зависимость величины поглощаемой энергии лазерного излучения от радиуса луча в зоне формирования соединений лазерной микропайкой и сваркой (рис. 1). При радиусе луча 2 мм величина поглощаемой энергии отличается почти вдвое.

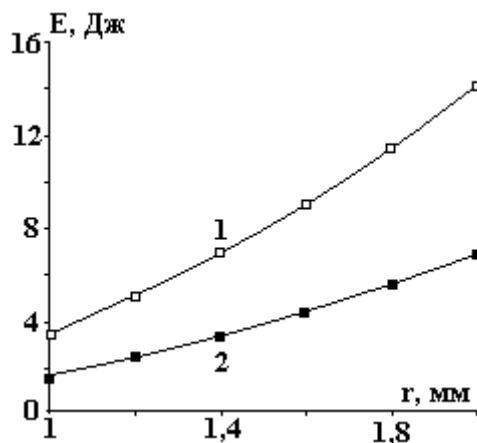


Рис. 1. Зависимости величины поглощенной энергии лазерного излучения от радиуса луча и типа соединения: 1 – сварка, 2 – микропайка

При лазерном нагреве сфокусированным излучением в виде отдельного импульса температурное поле может быть представлено в виде процесса распространения теплоты мгновенного линейного источника с энергией Q , выделившейся в пластине с равномерным распределением по толщине в начальный момент времени $t = 0$:

$$T(r, t) = \frac{Q}{4\pi \cdot \lambda \cdot \delta \cdot t} e^{-\frac{r^2}{4at} - bt}, \quad (6)$$

где r – расстояние от источника теплоты до точки с координатами (x, y) ; δ – толщина пластины; $b = 2\alpha / (c\gamma \cdot \delta)$ – коэффициент температуропередачи, учитывающий поверхностную теплоотдачу в окружающую среду (α – коэффициент полной поверхностной теплоотдачи).

Приращение температуры в любой момент времени при нагреве импульсным источником лазерного излучения определяется следующим образом:

$$dT = \frac{q \cdot dt}{4\pi \cdot \lambda \cdot \delta \cdot t} \cdot e^{-\frac{r^2}{4at}}. \quad (7)$$

Используя выражение (7), можно рассчитать температуру в произвольной точке поверхности при воздействии на нее лазерного излучения. Для периодического лазерного воздействия процесс нагрева описывается в виде серии непрерывно действующих мгновенных источников теплоты.

Для одного такого мгновенного источника теплоты получено выражение, описывающее изменение температуры T_t в зоне нагрева в 3-мерном пространстве [2]. Моделирование процесса нагрева лазерным излучением контактных групп из БрБ2 с помощью прикладного математического программного пакета MathCAD 7 Pro по данному выражению позволило получить зависимость изменения температуры нагрева за время воздействия лазерного излучения в виде совокупности температурных импульсов (рис. 2). Граничные условия моделирования: длина волны излучения – 1,06 мкм, частота следования импульсов – 10 Гц, длительность импульса – 0,1 с, длительность процесса – 1,0 с, КПД лазерной установки – 0,25. Анализ зависимости показывает, что для расплавления данного материала без учета теплообмена с окружающей средой достаточно двух импульсов, а с учетом – трех импульсов. Данная модель не учитывает зависимости изменения коэффициентов теплопроводности и температуропроводности от роста температуры, поскольку для процессов пайки эти изменения не столь существенны.

Устройство лазерного формирования контактных соединений (рис. 3) состоит из источника оптического излучения 1, блоков регулирования энергии излучения 2, питания БП и управления БУ, оптической системы 5 и системы охлаждения лазера. В качестве источника оптического излучения

применен квантовый генератор на алюмоиттриевом гранате с неодимом с длиной волны 1,06 мкм, длительностью импульсов 0,1 с и частотой следования 1–50 Гц. Для накачки активного элемента использована ИК-лампа мощностью 2 кВт. Энергия импульса лазерного излучения составляла 0,75 Дж при напряжении на лампе накачки 900 В и частоте импульсов 3 Гц, а средняя мощность излучения в импульсе – 3,75 кВт.

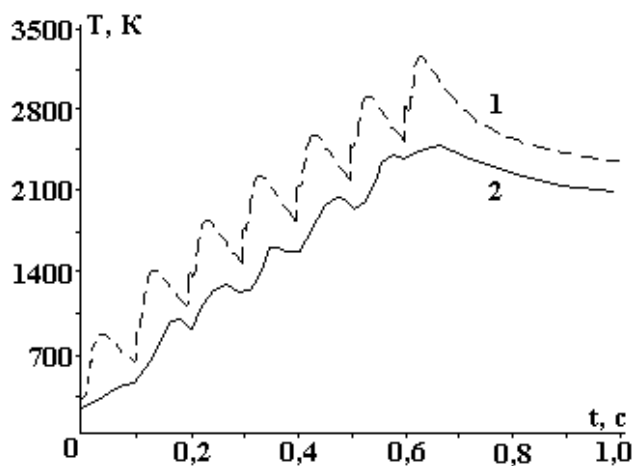


Рис. 2. Температурные циклы в зоне нагрева импульсного лазерного излучения: 1 – без учета теплообмена, 2 – с учетом теплообмена

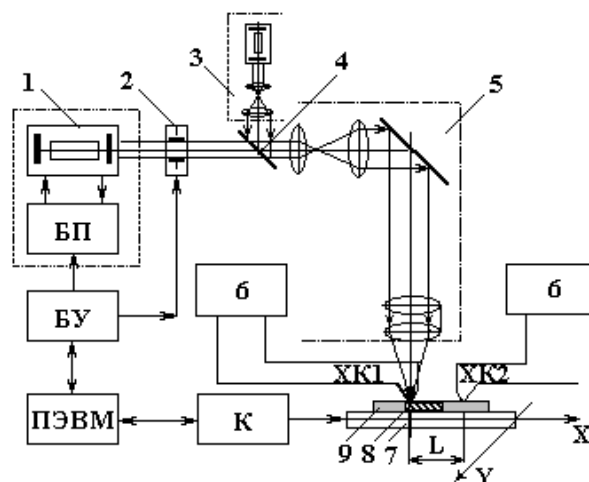


Рис. 3. Схема лазерной установки

Оптическая система 5 формировала пространственные характеристики пучка как инструмента обработки. Фокусное расстояние оптической системы составляло 150 мм. Для наводки оптического излучения и юстировки оптической системы использовался маломощный газовый лазер 3, излучение от которого вводилось в оптическую систему формирования лазерного излучения с помощью полупрозрачного зеркала 4. Для позиционирования изделий 8, 9 применен координатный стол 7 с двумя степенями свободы и точностью позиционирования $\pm 0,1$ мм. Управление работой лазера и координатного стола организовано от ПЭВМ с помощью контроллера К. В установке применена двухконтурная система охлаждения лазера с теплообменным устройством типа «вода-вода» с термостабилизацией охлаждающей жидкости, циркулирующей по замкнутому контуру при помощи жидкостного насоса УО-1.

Плотность лазерного излучения определялась косвенным путем по температуре нагрева поверхности с помощью радиометра и двух измерителей температуры 6. Радиометр представлял собой печатную плату с металлизированным отверстием 8, в котором закреплена термопара типа ХК с помощью теплопроводящего клея в глухом отверстии с обратной стороны платы. Прибор MASTECH MV64 6 регистрировал температуру с точностью $\pm 1^{\circ}\text{C}$ в диапазоне от 0 до 1000°C . Температура нагрева контактных площадок и безвыводных элементов (резисторов, конденсаторов) измерялась термопарой, закрепленной в сквозном отверстии легкоплавким припоем. Для определения влияния лазерного излучения на термочувствительные элементы в зоне воздействия лазерного луча и на расстоянии L от нее размещались две термопары типа ХК, подключенные к разным измерителям температуры.

При средней мощности излучения в импульсе 3,75 кВт и энергии излучения до 2 Дж температура 300°C в зоне взаимодействия при диаметре пятна излучения 3 мм и частоте импульсов 10 Гц достигалась за 1–2 с.

Исследовался процесс лазерной пайки ИМС в корпусах с планарными выводами типов 401.14, 402.16, а также матричных БИС (МАБИС) серии КА1843, имеющих 108 выводов с шагом 0,625 мм на контактные площадки двусторонних печатных плат. Мощность лазерного излучения регулировалась в пределах 20–120 Вт путем изменения тока поджига. Нестабильность мощности излучения была не более 3%, нестабильность размеров пятна на выводах ИМС – не более 3,5% [3]. Координатный стол с помощью шаговых двигателей обеспечивал позиционирование выводов ИМС относительно луча не хуже $\pm 0,1$ мм с нестабильностью скорости перемещения не более 2,5%. Скорость перемещения платы программировалась и автоматически менялась в соответствии с программой. Фиксация коваровых выводов относительно контактных площадок обеспечивалась магнитной системой, расположенной под печатной платой и создающей магнитное поле с напряженностью $(16\text{--}20)\cdot 10^4$ А/м, которое обеспечивало фиксацию ИМС и МАБИС. Для наблюдения использована

малогабаритная телевизионная система на базе телевизора «Электроника-100», формирующая увеличенное в 15 раз изображение рабочей зоны. Это исключило необходимость прямого наблюдения через окуляр оптической системы СОК-1, а также повысило удобство работы и безопасность оператора.

Подготовка выводов включала их формовку, опрессовку припоем ПОС 61 диаметром 0,4 мм, для других партий на места будущих паек через трафарет наносилась паяльная паста ПЛ-1 с содержанием припоя по массе 75% и максимальным диаметром частиц до 150 мкм. В процессе исследований диаметр луча изменялся в пределах 1–2,5 мм, скорость перемещения платы – 4–20 мм/с. Качество паяных соединений оценивали с помощью микроскопа МБС-2 при увеличении 32^{\times} . Результаты исследований качества паяных соединений показали, что хорошее качество соединений достигается в случае напесованного припоя при мощности 26 Вт и скорости 4 мм/с, а для пасты – при 24 Вт и 7 мм/с. Применение паяльной пасты снизило требуемую мощность энергии излучения. При пайке также важно обеспечить надежное контактирование всех выводов ИМС с контактными площадками платы, в противном случае нанесенный припой оплавится вокруг вывода, а контакт с платой отсутствует. Тепловой режим, устанавливаемый в зоне пайки, зависит как от мощности лазерного излучения, скорости перемещения луча и его диаметра, так и от количества вносимого в зону пайки припоя. При толщине наносимой паяльной пасты свыше 200 мкм в результате ее разбрызгивания на поверхности платы образуются шарики припоя и перемычки между выводами ИМС. Установлена определенная зависимость массы расплавленной пасты припоя от времени и мощности лазерного излучения. Так, для скорости перемещения 4 мм/с и мощности лазера до 30 Вт масса расплава не превышает 2–3 мг в соединении. Увеличение мощности излучения с целью более полного расплавления всей нанесенной пасты приведет к повреждению диэлектрика платы. Отмечена также нестабильность характеристик лазерного излучения в течение длительного срока работы, которая возрастает с увеличением мощности.

Оптимальными режимами процесса лазерной пайки, при которых обеспечивается высокое качество соединений лазерного излучения, и которые не оказывают отрицательного влияния на электроизоляционные свойства диэлектрика печатных плат, являются: мощность 24 Вт, диаметр пятна 2,5 мм, скорость перемещения платы 7 мм/с. Производительность пайки МАБИС с шагом выводов 0,625 составляла до 300 соедин/мин.

Исследовались температурные зависимости в зоне нагрева от частоты следования импульсов оптического излучения (f , Гц), смещения зоны нагрева от осевой линии излучателя (X , мм), диаметра пятна лазерного излучения на исследуемом объекте (D , мм), степени черноты поверхности (ξ) [4]. Зависимости температуры нагрева от времени облучения и частоты импульсов при различных рабочих частотах ОКГ и напряжении питания ИК лампы накачки 700 В представлены на рис. 4,а, от диаметра луча – на рис. 4,б. Скорость нарастания температуры на начальном участке пропорциональна частоте импульсов излучения, однако с увеличением времени облучения до 20 с уменьшается до $5^{\circ}\text{C}/\text{с}$. Температура нагрева нелинейно растет с уменьшением диаметра луча в зоне пайки и с увеличением частоты импульсов, что может привести к перегреву, испарению припоя и повреждению изделий.

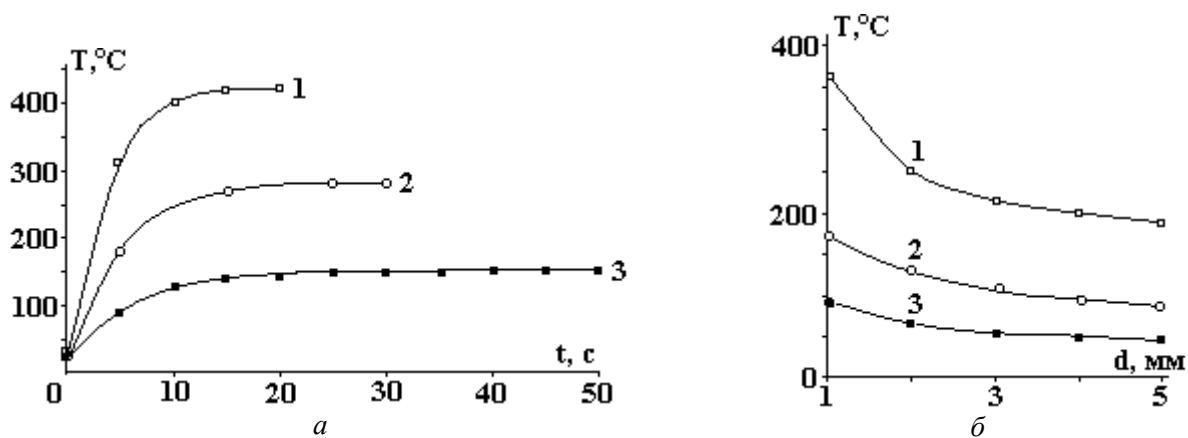


Рис. 4. Зависимости температуры нагрева зоны пайки от времени облучения (а), диаметра луча (б) и частоты импульсов f , Гц: 1 – 10; 2 – 5; 3 – 3

Анализ зависимости времени расплавления припоя от его массы и частоты следования импульсов лазерного излучения (рис. 5) показал, что необходимо выбирать диаметр луча, соизмеримый

с размерами соединений, частоту следования импульсов – 10 Гц при массе припоя 10–20 мг, поскольку при этом достигается максимальная скорость нагрева припоя, что удовлетворяет требованиям высокой производительности процесса и минимального воздействия на изделия.

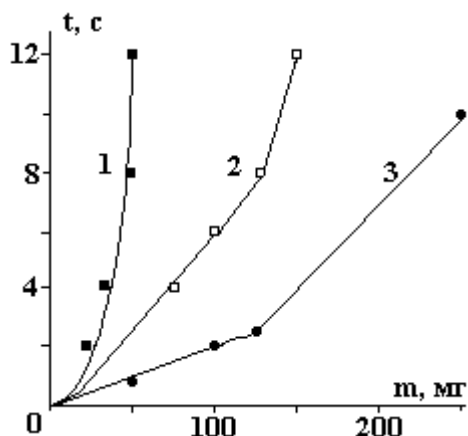


Рис. 5. Зависимости времени облучения припоя от его массы и частоты следования импульсов f , Гц: 1 – 3, 2 – 5, 3 – 10

Экспериментальные исследования процесса микросварки контактов реле из бериллиевой бронзы показали, что глубина проплавления материала линейно зависит от энергии излучения лазера при постоянных длительности импульса 4 мс и диаметре лазерного пучка 0,5 мм (рис. 6). При увеличении энергии прочность соединений сначала растет (рис. 7), что связано с увеличением глубины и диаметра зоны проплавления. Однако, когда энергия излучения больше 3 Дж, плотность мощности оказывается достаточной для выброса части расплавленного металла из сварочной ванны вследствие интенсивного испарения, поэтому площадь сечения сварной зоны, а вместе с ней и прочность уменьшаются.

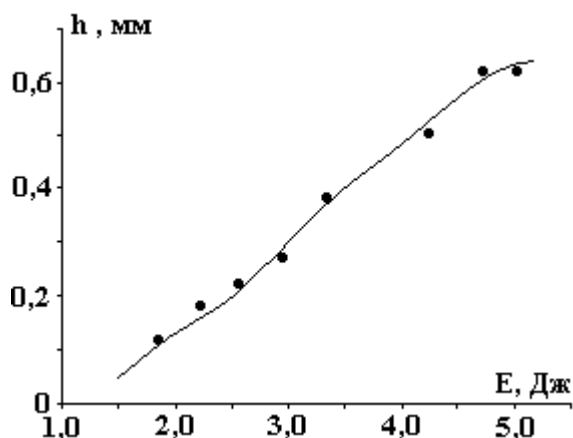


Рис. 6. Зависимость глубины проплавления от энергии излучения

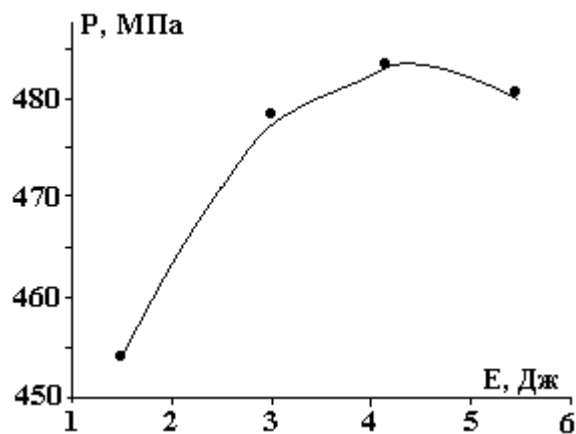


Рис. 7. Зависимость прочности сварного соединения от энергии в импульсе

Преимущества лазерного излучения, по сравнению с некогерентным инфракрасным, заключаются в высокой локализации мощности в зоне нагрева (до 10^{12} Вт/м²); безынерционности воздействия, что позволяет вести нагрев импульсами малой длительности и точно дозировать энергию излучения; малой зоне термического влияния (0,25–2,0 мм). Оптимизация параметров импульсного лазерного излучения позволяет вести прецизионную скоростную пайку планарных выводов ИМС и многовыводных МАБИС к контактным площадкам печатных плат, безвыводных "чиповых" элементов на платы микросборок с высоким качеством, микросварку контактов микромощных реле, автоматизировать процесс, что наиболее полно отвечает требованиям современной технологии поверхностного монтажа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лазерная техника и технология / Под ред. А.Г. Григорьина. М., 1988.
2. Ланин В.Л. Эффективность нагрева концентрированными потоками энергии при пайке в электронике // Электронная обработка материалов. 2002. № 2. С. 17–20.
3. Абакумов А.В., Ланин В.Л. Лазерная пайка интегральных микросхем на печатные платы // Радиопромышленность. 1991. № 5. С. 16–19.

Summary

Parameters of the laser soldering and microwelding of electronics products are investigated and optimized. Optimum modes of the laser soldering are: capacity 24 Wt, diameter of a beam of 2.5 mm, speed of moving 7 mm / with, productivity up to 300 contacts/minutes. Depth of fusion at microwelding linearly depends on energy of radiation, duration of a pulse and diameter of a laser beam.

Б.Э. Эгамбердиев, Б.Ч. Холлиев, А.С. Маллаев

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ И ПРОФИЛЕЙ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ИОННО-ИМПЛАНТИРОВАННОГО МАРГАНЦА В КРЕМНИИ

*Ташкентский государственный технический университет,
ул. Университетская, 2, г. Ташкент, 700095, Республика Узбекистан*

В полупроводниковой микроэлектронике широкое применение находят материалы, в которые вводятся примеси путем ионной имплантации, позволяющие в широком диапазоне варьировать концентрацию легирующих элементов в приповерхностных слоях.

Как известно, профили распределения примесей в кремнии, легированных элементами, создающими мелкие уровни, описываются теорией ЛШШ.

Цель настоящей работы – изучение имплантированных атомов марганца в кремнии в зависимости от дозы имплантации и температуры отжига.

Для исследований использован кремний p -типа марки КДБ-10, имплантированный марганцем с дозой 10^{15} – 10^{17} ион/см². В целях активации примесей и отжига радиационных дефектов производится термоотжиг в интервале температур 300–1000⁰С.

Профили распределения марганца в кремнии определены методом вторично ионно-масс-спектрометрии (ВИМС), а также послойным измерением удельного сопротивления 4 зондовым методом в комбинации с удалением тонких слоев медленным травлением.

На рис. 1 показана зависимость изменения поверхностного сопротивления ρ_n – образцов с дозой имплантации $N_0=10^{16}$ ион/см² от длительности отжига при температурах 300, 515 и 600⁰С. Из рисунка следует, что с ростом длительности отжига сначала ρ_n повышается до некоторого максимального значения, затем снижается до параметров исходного материала независимо от температуры. При этом резкое изменение ρ_n происходит при температуре 300⁰С, так как за 60 мин отжига восстанавливаются параметры исходного материала. Наиболее медленное восстановление параметров исходного материала наблюдается при температуре 515⁰С.

Аналогичные зависимости изменения ρ_n от длительности отжига характерны для всех доз имплантации. При температурах до 600⁰С зависимость изменения ρ_n также не зависела от вакуума. В отличие от этого при $T > 600^0$ С изменения ρ_n от длительности отжига становятся зависимыми от условий отжига. Такая зависимость при $T = 800^0$ С приведена на рис. 2.

Как видно, при отжиге под давлением аргона характер изменения ρ_n аналогичен характеру изменения при $T = 600^0$ С, тогда как ρ_n образцов, отожженных в вакууме, по мере повышения длите-

Summary

Parameters of the laser soldering and microwelding of electronics products are investigated and optimized. Optimum modes of the laser soldering are: capacity 24 Wt, diameter of a beam of 2.5 mm, speed of moving 7 mm / with, productivity up to 300 contacts/minutes. Depth of fusion at microwelding linearly depends on energy of radiation, duration of a pulse and diameter of a laser beam.

Б.Э. Эгамбердиев, Б.Ч. Холлиев, А.С. Маллаев

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ И ПРОФИЛЕЙ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ИОННО-ИМПЛАНТИРОВАННОГО МАРГАНЦА В КРЕМНИИ

*Ташкентский государственный технический университет,
ул. Университетская, 2, г. Ташкент, 700095, Республика Узбекистан*

В полупроводниковой микроэлектронике широкое применение находят материалы, в которые вводятся примеси путем ионной имплантации, позволяющие в широком диапазоне варьировать концентрацию легирующих элементов в приповерхностных слоях.

Как известно, профили распределения примесей в кремнии, легированных элементами, создающими мелкие уровни, описываются теорией ЛШШ.

Цель настоящей работы – изучение имплантированных атомов марганца в кремнии в зависимости от дозы имплантации и температуры отжига.

Для исследований использован кремний p -типа марки КДБ-10, имплантированный марганцем с дозой 10^{15} – 10^{17} ион/см². В целях активации примесей и отжига радиационных дефектов производится термоотжиг в интервале температур 300–1000⁰С.

Профили распределения марганца в кремнии определены методом вторично ионно-масс-спектрометрии (ВИМС), а также послойным измерением удельного сопротивления 4 зондовым методом в комбинации с удалением тонких слоев медленным травлением.

На рис. 1 показана зависимость изменения поверхностного сопротивления ρ_n – образцов с дозой имплантации $N_0=10^{16}$ ион/см² от длительности отжига при температурах 300, 515 и 600⁰С. Из рисунка следует, что с ростом длительности отжига сначала ρ_n повышается до некоторого максимального значения, затем снижается до параметров исходного материала независимо от температуры. При этом резкое изменение ρ_n происходит при температуре 300⁰С, так как за 60 мин отжига восстанавливаются параметры исходного материала. Наиболее медленное восстановление параметров исходного материала наблюдается при температуре 515⁰С.

Аналогичные зависимости изменения ρ_n от длительности отжига характерны для всех доз имплантации. При температурах до 600⁰С зависимость изменения ρ_n также не зависела от вакуума. В отличие от этого при $T > 600^0$ С изменения ρ_n от длительности отжига становятся зависимыми от условий отжига. Такая зависимость при $T = 800^0$ С приведена на рис. 2.

Как видно, при отжиге под давлением аргона характер изменения ρ_n аналогичен характеру изменения при $T = 600^0$ С, тогда как ρ_n образцов, отожженных в вакууме, по мере повышения длите-

льности отжига увеличивается, достигая своего максимального значения (n -тип $\rho_n = 1,1 \cdot 10^5$ Ом) в течение 1 часа. В дальнейшем ρ_n несколько уменьшается.

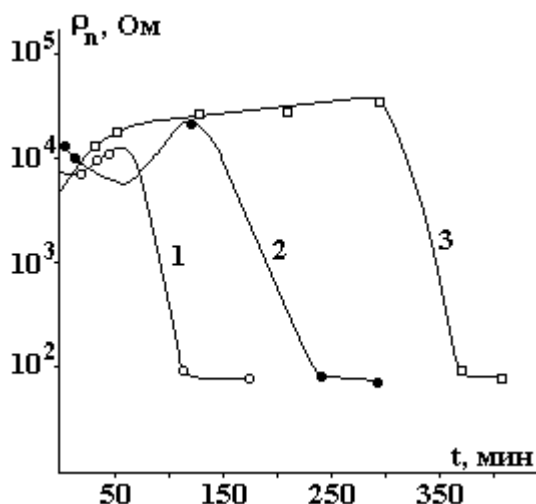


Рис. 1. Зависимость изменения ρ_n от температуры и длительности отжига. $N_0 = 10^{16}$ ион/см²; T , °C: 1 – 300; 2 – 515; 3 – 600

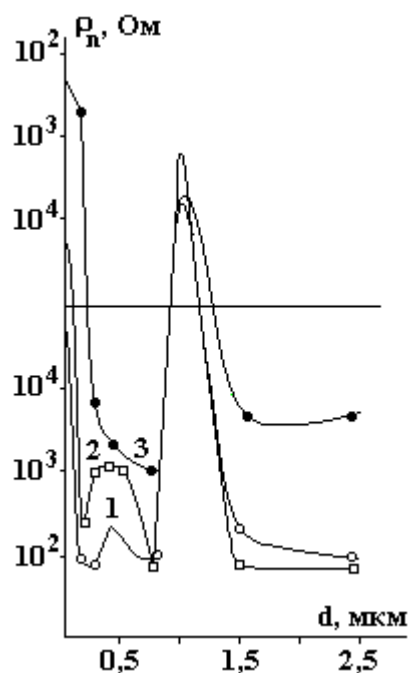


Рис. 2. Профиль распределения ρ_n в зависимости от температуры отжига. $N_0 = 10^{16}$ ион/см²; $t = 60$ мин, $P = 10^{-4}$ мм рт.ст., T , °C: 1 – 600; 2 – 800; 3 – 1000

Теперь приступим к рассмотрению профиля распределения по глубине образца, так как он несет информацию о профиле распределения имплантированных атомов. На рис. 2 приведены профили распределения ρ_n образцов, отожженных при 600, 800 и 1000°C под вакуумом 10^{-4} мм рт. ст., снятые в течение 1 часа. Из рисунка следует, что профиль распределения имеет три участка: первый – это поверхностный участок, где происходит резкое изменение ρ_n вглубь кристалла. Протяженность 1-го участка увеличивается по мере роста температуры отжига; второй – средний участок, где профиль ρ_n более однороден, если не учитывать некоторый рост при глубине 0,4 мкм, при $T = 700^\circ\text{C}$ на данном участке с ростом T величина ρ_n несколько увеличивается; третий – на этом участке происходит вновь резкое повышение ρ_n с последующей инверсией проводимости на n -тип. На глубине 1 мкм происходит максимальное изменение ρ_n , и в дальнейшем величины ρ_n резко уменьшаются до параметров исходного материала. Следует отметить, что путем термоотжига в интервале температур $T = 700\text{--}1000^\circ\text{C}$ в образцах кремния, имплантированных MN с дозой 10^{16} ион/см² в течение 1 часа, могут быть получены скрытые p - n переходы на глубине 1 мкм.

Особое внимание представляет исследование влияния условий отжига на профиль распределения ρ_n . На рис. 3 показан профиль распределения ρ_n в зависимости от длительности отжига для образцов с дозой $N_0 = 10^{16}$ ион/см², отожженных в вакууме при $T = 800^\circ\text{C}$; для сравнения на этом рисунке приведены также профили распределения образцов, отожженных под давлением аргона в течение 2 часов. Из рисунка следует, что повышение длительности отжига до 2 часов приводит к резкому повышению ρ_n второго участка. При длительности же отжига 3 часа ρ_n второго участка вновь становится сравнимым с ρ_n при часовом отжиге. Протяженность первого участка зависит от длительности отжига, и с ростом последнего она углубляется в объем кристалла. В отличие от образцов, отожженных в вакууме, в образце, отожженном под давлением аргона, первый участок отсутствует, а на втором участке появляются два максимума на глубинах 0,25 и 0,5 мкм.

Следует отметить, что наблюдаемые изменения ρ_n при температурах отжига $T < 1000^\circ\text{C}$ происходят лишь на приповерхностном участке. Тогда как в объеме кристалла заметное изменение удельного сопротивления не наблюдается.

С целью уточнения возможности применения теории ЛШШ для описания профилей распределения имплантированных атомов марганца в кремнии, а также установления природы изменения ρ_n исследованы спектры ВИМС как до, так и после различных термообработок.

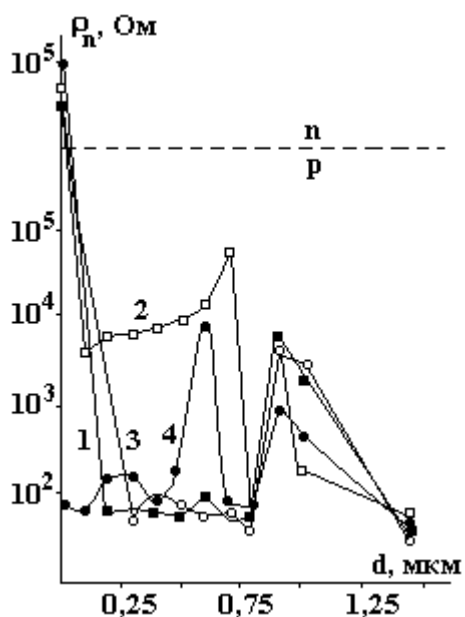


Рис. 3. Профиль распределения ρ_n в зависимости от длительности отжига. $P = 10^4$ мм рт.ст. под давлением Ar; t , мин: 1 – 60; 2 и 4 – 120; 3 – 180

Из результатов по исследованию профиля распределения образцов кремния, отожженных при различных температурах, имплантированного марганцем, следует, что величина поверхностного ρ_n и протяженность первого участка зависят от условий отжига (температуры, длительности отжига, остаточного давления в ампуле). Если учесть, что и профиль распределения марганца после отжига, также зависит от условий отжига, то очевидно, что этот участок повышения ρ_n образцов не носит диффузионного характера. В данном случае особенности изменения ρ_n могут быть связаны с наличием двух конкурирующих процессов:

- восстановления кристаллической решетки во время отжига, в процессе которого из-за ограниченной растворимости примесные атомы марганца вытесняются с поверхности кристалла в объем;
- усиления испарения марганца в процессе отжига, по мере снижения остаточного давления в ампуле марганец перемещается из объема на поверхность.

Если изменения величины ρ_n образцов кремния, имплантированного элементами 3-й и 5-й группы таблицы Менделеева, в процессе термообработки в интервале 600–1000⁰С связывают с активацией их в объеме кристаллов, то изменение ρ_n образцов кремния, имплантированного марганцем, все же трудно связать с непосредственной активацией самого марганца. Такое предположение связано с тем, что непосредственно примесные атомы марганца могут активироваться лишь в том случае, если они попадают в междоузельные кристаллические решетки или образуют различные донорные акцепторные комплексы с исходными атомами или дефектами кристаллической решетки. Возможно также образование нейтральных комплексов с отдельными точечными дефектами (вакансии, образующиеся в процессе ионной бомбардировки). Как междоузельные атомы марганца, так и их комплексы нестабильны при $T > 300^0$ С.

Таким образом можно отметить, что при термообработке образцов кремния, имплантированного марганцем, происходит сложный процесс активации марганца за счет образования различных силицидов как на поверхностном участке, так и в объеме кристалла.

Поступила 27.05.04

Summary

The results of investigation and research of some particularities of distribution and electro-physical properties of the ion-implanted Mn atoms in silicon as a function of the dose of implantation and the temperature of annealing are presented in the given work. It has been determined that in the process of thermal processing of the Mn- ion-implanted silicon samples, complex process of activation of Mn takes place. Meanwhile, the process of Mn activation takes place due to formation of various silicides both on the surface and in the bulk of crystal lattices.

ИСПЫТАНИЯ НА РАСТЯЖЕНИЕ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ, ИЗГОТАВЛИВАЕМЫХ МЕТОДОМ ПОЛИМЕРИЗАЦИИ ПРИ ЭЛЕКТРОНАГРЕВЕ

**Уфимский государственный авиационный технический университет,
ул. К.Маркса,12,Уфа-центр,450000, г. Башкортостан, Россия*

***Башкирский государственный педагогический университет,
ул. Октябрьской революции,3, Уфа-центр,450000, г. Башкортостан, Россия*

Композиционные материалы все шире внедряются в современное производство. Часть из них изготавливается в установках автоматического ведения технологического процесса (АВТП) методом полимеризации [1]. Они обладают уникальными упругими и прочностными свойствами, легки и надежны в эксплуатации. Тем не менее пользователей интересует надежность изделий из композиционных материалов на период их эксплуатации. Для лонжеронов лопастей вертолета – это три тысячи часов.

Испытание на растяжение является наиболее универсальным по сравнению с другими видами, так как оно позволяет определять механические свойства материала (пределы упругости и текучести, модуль упругости, временное сопротивление, относительное равномерное удлинение, относительное удлинение и сужение поперечного сечения после разрыва) на всех стадиях его деформации (от упругой деформации до разрушения). В связи с этим в работе приводятся результаты механических испытаний лонжеронов лопастей вертолетов на растяжение и расчет показателей надежности на период их эксплуатации.

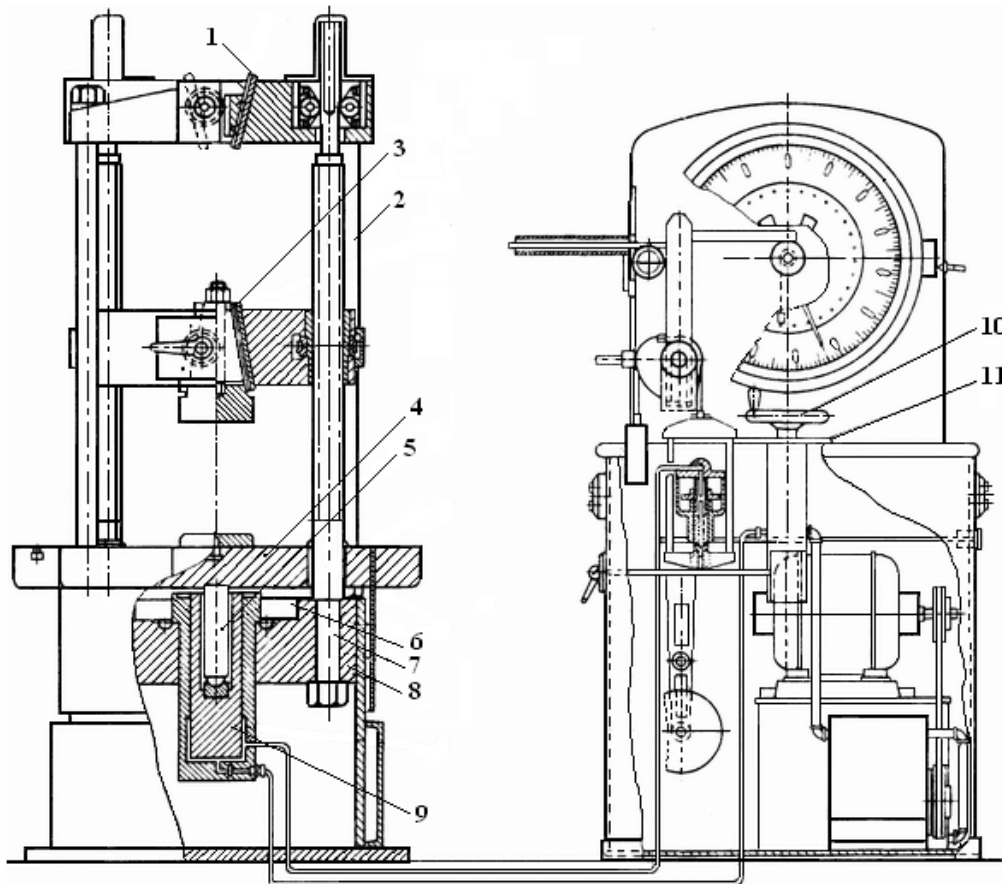


Рис. 1. Испытательная машина модели Р-2 с гидравлическим приводом

Оборудование для испытаний на растяжение. Испытания на растяжение материалов проводят на испытательной машине согласно [2]. Использовалась универсальная машина модели Р-2 фирмы «Риле» (США) (рис.1). Она предназначена для растяжения, сжатия, изгиба. Машина состоит из маятникового индикатора и насосного агрегата с устройством для нагружения образца. Устройство для нагружения снабжено двумя головками: верхней 1 и нижней 3 с клиновыми зажимами для испытания на растяжение. Рабочий стол (стол для сжатия образцов) 4 и верхняя тяговая головка 1 соединены четырьмя тросами 2, образующими клеть. Нижняя часть этой клетки (стол для сжатия образцов) 4 прикреплена к верхней части стойки 6 со сферическим нижним концом, установленной в шарообразном углублении в центре главного плунжера 5. Верхний конец клетки (верхняя тяговая головка 1) направляется роликовыми подшипниками на двух неподвижных винтах 7. Нижняя тяговая головка поддерживается двумя винтами 7, представляющими одно целое с фундаментной плитой 8. Главный цилиндр 9 с изоляцией от пыли и грязи установлен внутри плиты 8. Под действием гидравлического давления поршень поднимает вместе стол и верхнюю тяговую головку 1. Так как нижняя головка неподвижна, образец, закрепленный в верхней 1 и нижней 3 головках, подвергается действию растягивающей нагрузки, а образец, установленный между столом 4 и нижней головкой, – действию сжимающей нагрузки. Конечные выключатели исключают перегрузку при любом диапазоне нагрузок и превышение заданного хода плунжера. Маховик для регулирования скорости 10 и градуированный диск 11 установлены на большом столе впереди индикаторного агрегата. Маховик 10 приводит в действие специальный трехходовой вентиль, который служит для соединения главного цилиндра с системой, подающей масло под высоким давлением для создания нагрузки, или с реверсом для снятия нагрузки с образца и обратного хода. Этот вентиль необходим для управления потоком масла в обоих направлениях. Число скоростей для испытаний неограниченное, так как регулировка бесступенчатая. Скорости нагружения указаны на диске 11, градуированном в миллиметрах в минуту. Один поворот маховика 10 охватывает весь диапазон управления гидравлической системой (регулировка скорости, скорость приложения нагрузки, нуль, разгрузка и обратный ход).

Методика испытаний на растяжение. При растяжении образцов определяют следующие механические характеристики материала:

- предел прочности;
- предел упругости;
- модуль упругости;
- предел текучести;
- временное сопротивление;
- относительное равномерное удлинение;
- относительное удлинение после разрыва;
- относительное сужение поперечного сечения после разрыва.

Испытания проводят на образцах с рабочей частью в виде цилиндра, стержня с прямоугольным сечением или в виде «рыбки» (рис. 2).

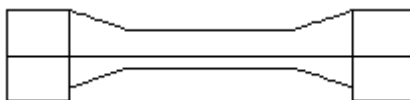


Рис. 2. Образец для испытаний

Подготовка образцов к испытанию начинается с их контроля. Образцы с механическими повреждениями, заусенцами, неправильной маркировкой, с нарушением требований к шероховатости поверхности, а также с размерами, превышающими допустимые, к испытанию не допускаются.

Испытание на растяжение проводят следующим образом. Сначала устанавливают необходимые зажимы для крепления образца. Назначают нагрузку и устанавливают стрелку на шкале индикаторного агрегата на эту нагрузку. Затем на маятнике машины устанавливают груз, соответствующий этой нагрузке. Стол поперечной подачи опускается для обеспечения достаточного хода при окончании испытания образца. Нижнюю тяговую головку регулируют для закрепления образца. Образец вставляют в зажим головок машины, при этом нулевая точка установлена на индикаторном диске. Затем диск поворачивают на необходимую скорость испытания. Производится растяжение образца. Диаграмма растяжения, то есть зависимость удлинения образца от прилагаемой нагрузки, записывается на миллиметровой бумаге.

Скорость нагружения образца машиной может быть изменена в пределах 0–10 м/мин. Погрешность показаний нагрузки составляет $\pm 1\%$. При этом в процессе нагружения образца ускорение движу-

щихся частей испытательной машины настолько мало, что возникающими в них силами инерции пренебрегают. Испытание на растяжение проводят при температуре $20 \pm 2^{\circ}\text{C}$.

Методика обработки результатов механических испытаний.

При статических испытаниях на растяжение образец деформируется при плавно возрастающей нагрузке вплоть до разрыва. При этом на диаграммном приборе, которым оборудованы испытательные машины, как указано выше, автоматически вычерчивается кривая, показывающая зависимость между силой, действующей на образец, и вызываемой ею деформацией. Такая кривая растяжения образца показана на рис. 3.

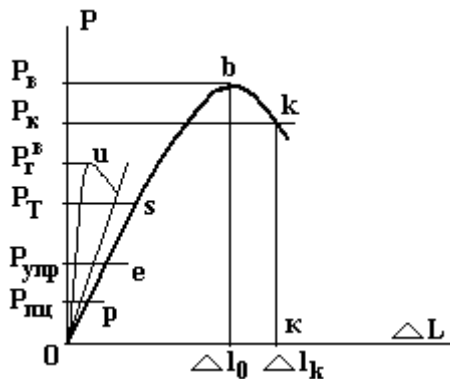


Рис. 3. Кривая растяжения материала

Первая характерная точка на диаграмме растяжения – точка p . Усилие $P_{пл}$ определяет величину предела пропорциональности – напряжения, которое материал образца выдерживают без отклонения от закона Гука. Для определения величины предела пропорциональности графически необходимо продолжить прямолинейный участок до пересечения с осью деформаций в точке O , которую и принимают за новое начало координат, исключая таким образом искаженный из-за недостаточной жесткости машины начальный участок диаграммы (рис. 4). Далее на произвольной высоте в пределах упругой области восстанавливают перпендикуляр AB к оси нагрузок, откладывают вдоль него отрезок $BC = \frac{1}{2} AB$ и проводят линию OC . При этом $\text{tg}\alpha' = (\text{tg}\alpha)/1,5$, затем если провести касательную к кривой растяжения параллельно OC , то точка касания p определит искомую нагрузку $P_{пл}$ (рис. 4). Условный предел пропорциональности определяем по формуле $\sigma_{пл} = P_{пл}/F_0$, где F_0 – начальная площадь поперечного сечения образца.

Следующая характерная точка на первичной диаграмме растяжения – точка e (рис. 3). Ей отвечает нагрузка, по которой рассчитывают условный предел упругости $P_{упр}$ – напряжение, при котором остаточное удлинение достигает заданной величины. Таким образом, предел упругости характеризует напряжение, при котором появляются первые признаки макропластической деформации. В связи с малым допуском по остаточному удлинению даже $\sigma_{0,05}$ трудно с достаточной точностью определить по диаграмме растяжения. Поэтому в тех случаях, когда высокой точности не требуется, предел упругости принимают равным пределу пропорциональности (рис. 4).

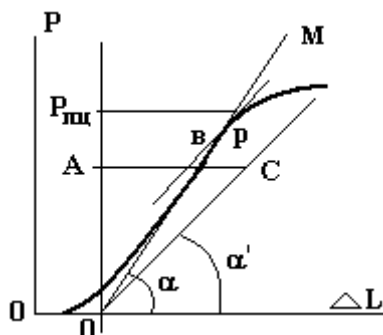


Рис. 4. Кривая растяжения для определения предела упругости материала

Характеристику предела текучести P_T подсчитывают по формуле $\sigma_{0,2} = P_{0,2}/F_0$, величину нагрузки при $P_{0,2}$ определяют следующим образом. На диаграмме растяжения (рис. 5) проводят прямую OA , совпадающую с прямолинейным участком кривой, отбрасывая начальную криволинейную часть. От точки пересечения прямой OA с осью деформации откладывают в масштабе с диаграммы на оси абс-

цисс вправо от точки О отрезок ОЕ, равный 0,2 % первоначальной рабочей длины образца. От точки Е проводят прямую ЕД, параллельную ОА, до пересечения с кривой растяжения в точке Д. Ордината этой точки Р определяет величину нагрузки $P_{0,2}$ на условном пределе текучести.

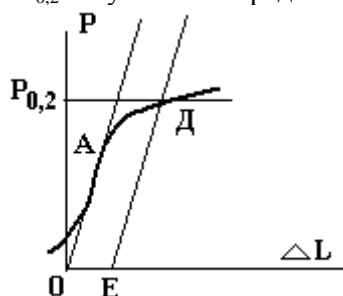


Рис.5. Кривая растяжения для определения предела текучести материала

Временное сопротивление разрыву (предел прочности) определяют по формуле

$$\sigma_{вр} = P_{\max} / F_0.$$

Для определения расчетной длины образца после разрыва l_k обе его части прикладывают одну к другой как можно плотнее. Длины l_k определяют следующим образом. Если разрыв произошел на расстоянии не менее $1/3 l_0$ от края расчетной длины, то за l_k принимают расстояние между рисками, определяющими границы расчетной длины. Если разрыв произошел на расстоянии менее $1/3 l_0$ от края расчетной длины, то конечную длину расчетной части образца l_k определяют с отнесением места разрыва посередине для определения относительного сужения, после разрыва образца измеряют диаметр в месте разрыва в двух взаимно перпендикулярных направлениях и берут среднее из полученных значений. Относительное сужение (%) определяют по формуле $\Psi = (F_0 - F_k / F_0) \cdot 100 = (d_0^2 - d_k^2 / d_0^2) \cdot 100$, где d_0 – диаметр образца до испытания в мм; d_k – диаметр (средний) образца в месте разрыва в мм.

Настоящая методика распространяется на слоистые композиционные материалы на полимерной матрице типа угле-, боро-, стеклопластиков.

Результаты испытаний.

На рис. 6 показана зависимость предела прочности композиционного материала от относительной длины растяжения, соответствующая скорости нагрева $2 \text{ }^\circ\text{C}/\text{мин}$. Из представленного рисунка, используя описанную методику, определены такие параметры композиционного материала, как предел пропорциональности, равный 640 МПа, предел текучести – 750 МПа, предел прочности – 760 МПа.

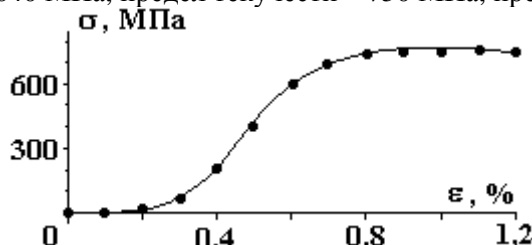


Рис. 6. Зависимость предела прочности композиционного материала от относительной длины растяжения

Аналогичные исследования проведены при различных комбинациях скорости нагрева и охлаждения композиционного материала. В частности, скорости нагрева и охлаждения изменялись от 1 до $5 \text{ }^\circ\text{C}/\text{мин}$. На рис. 7 показана зависимость предела прочности материала от этих параметров. Как видно из рисунка, предел прочности материала наибольший при скоростях нагрева и охлаждения, равных $2 \text{ }^\circ\text{C}/\text{мин}$.

Основы расчета показателей надежности.

В процессе эксплуатации технические объекты подвергаются внешним воздействиям со стороны среды и обслуживающего персонала. Это приводит к тому, что со временем начальные параметры, заложенные при проектировании объекта, начинают изменяться (ухудшаться) и к некоторому моменту времени объект становится либо функционально непригодным, либо аварийно опасным. Общие признаки различных объектов, по которым можно судить о возможности или целесообразности эксплуатировать объект по истечении определенного срока, позволяют сформулировать определение надежности. Под надежностью понимают свойство системы (объекта) выполнять заданные функции на определенном интервале времени и при этом поддерживать значение установленных производственных характеристик в заданных границах при соответствующих условиях эксплуатации, ремонта, хранения и транспортировки.

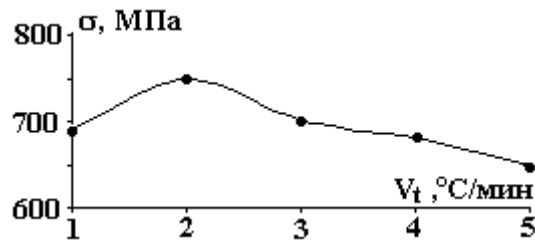


Рис. 7. Зависимость предела прочности композиционного материала от скорости нагрева

Основными характеристиками надежности изделий являются вероятность безотказной работы и интенсивность отказов. Вероятность безотказной работы определяется в предположении, что в начальный момент времени объект находился в работоспособном состоянии. Обозначим через t время или суммарную наработку объекта (в дальнейшем для краткости назовем t просто наработкой). Возникновение первого отказа – случайное событие, а наработка τ от начального момента до возникновения этого события – случайная величина. Вероятность безотказной работы $P(t)$ объекта в интервале от 0 до t включительно определяют как

$$P(t) = P\{\tau > t\}, \quad (1)$$

здесь $P\{\dots\}$ – вероятность события, заключенного в скобках. Вероятность безотказной работы $P(t)$ является функцией наработки t . Обычно эту функцию предполагают непрерывной и дифференцируемой.

Вероятность безотказной работы $P(t)$ связана с функцией распределения $F(t)$ и плотностью распределения $f(t)$ наработки до отказа:

$$P(t) = 1 - F(t); \quad f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = - \frac{dP(t)}{dt}. \quad (2)$$

Интенсивность отказов $\lambda(t)$ определяется по формуле

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{1 - F(t)} = - \frac{1}{P(t)} \frac{dP(t)}{dt}. \quad (3)$$

Для высоконадежных систем $P(t) \approx 1$, так что интенсивность отказов приближенно равна плотности распределения наработки на отказ.

Из формулы (3) следует, что вероятность безотказной работы (надежность) за период $(0, t)$ определяется по формуле

$$P(t) = 1 - F(t) = \exp(-\lambda(t) \cdot t). \quad (4)$$

При $\lambda(t) = \text{const} = \lambda$

$$P(t) = \exp(-\lambda \cdot t). \quad (5)$$

Статистическая обработка результатов механических испытаний на растяжение лонжерона лопастей вертолетов и расчет показателей надежности.

1. По результатам механических испытаний на растяжение определим изменение длины образца, расположим полученные данные изменения длины образца x_n в порядке их возрастания, то есть в вариационный ряд:

$$x_{\min} = 54,4, 56,2, 58,1, 58,4, 59,4, 59,9, 60,7, 61,0, 61,3, 61,9, 62, 963,5, 63,7, 64,5, 65,2, 66,0, 66,1, 66,4, 66,4, 67,0, 67,2, 70,0, 70,4, 71,0, 71,0, 71,3, 76,3, 77,3, 77,8, 78,6, 87,6, 87,6, 90,8, 93,7, 94,2, 94,4, 95,1, 95,6, 96,4, = x_{\max} (\text{в мм}).$$

2. Находим размах (широту) распределения:

$$R = x_{\max} - x_{\min} = 96,4 - 54,4 = 43 \text{ мм.}$$

3. Разбиваем весь диапазон на определенное число интервалов:

$$S = 1 + \ln_2 40 \approx 8.$$

4. Отмечаем крайние точки каждого интервала и их середины:

$$h = 48 : 8 = 5,375, \\ (53,4, 58,775), (58,775, 64,15), (64,15, 69,525), (69,525, 74,9), \\ (74,9, 80,275), (80,275, 85,65), (85,65, 91,025), (91,025, 96,4), \\ c_1 = 56,0875, c_2 = 61,4625, c_3 = 66,8375, c_4 = 72,2125, c_5 = 77,5875, \\ c_6 = 82,9625, c_7 = 88,3375, c_8 = 93,7125.$$

5. Подсчитываем число экспериментальных данных, попавших в каждую из полученных интервалов, и находим относительные частоты. Составим таблицу (статистический ряд):

$$m_1=4, m_2=9, m_3=8, m_4=6, m_5=4, m_6=0, m_7=3, m_8=6, \\ w_1=0,1, w_2=0,225, w_3=0,2, w_4=0,15, w_5=0,1, w_6=0, w_7=0,075, w_8=0,15.$$

№ интервала	Интервалы	m_i	w_i
1	53,4—58,775	4	0,1
2	58,775—64,15	9	0,225
3	64,15—69,525	8	0,2
4	69,525—74,9	6	0,15
5	74,9—80,275	4	0,1
6	80,275—85,65	0	0
7	85,65—91,025	3	0,075
8	91,025—96,4	6	0,15

6. Находим эмпирическую функцию распределения:

$$F^*(x) = \begin{cases} 0, & x < 53,4 \\ 0,1 & x < 58,775 \\ 0,325 & x < 64,15 \\ 0,525 & x < 69,525 \\ 0,675 & x < 74,9 \\ 0,775 & x < 80,275 \\ 0,775 & x < 85,65 \\ 0,85 & x < 91,025 \\ 1, & x > 96,4 \end{cases}$$

Находим числовые характеристики:

$$\text{среднюю длину образца } \bar{x} = \frac{1}{40} \sum_{i=1}^{40} x_i \approx 71,96 \text{ мм,}$$

$$\text{дисперсию } D^* = \frac{1}{40} \sum_{i=1}^{40} x_i^2 - (71,96)^2 \approx 159,73 \text{ мм}^2,$$

$$\delta^*(x) \approx 12,6.$$

По результатам статистической обработки механических испытаний на растяжение по длине и статистическим данным эксплуатации изделий рассчитана интенсивность отказов, которая составила $\lambda = 25 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$.

Тогда, в соответствии с формулой (5), вероятность безотказной работы (надежность) за период времени (0–3000) часов определяется по формуле

$$P(3000) = 1 - F(3000) = \exp(-25 \cdot 10^{-6} \cdot 3000) \approx 0,923, \text{ то есть составляет } 92,3\%.$$

ЛИТЕРАТУРА

1. Акимов А.И., Акимов А.И., Фатыхов М.А. Экспериментальное исследование тепломассообмена в установке автоматического ведения технологического процесса и сопоставление теории эксперимента // Электронная обработка материалов. 2003. № 2. С. 22–26.
2. ГОСТ 28840-90.

Поступила 27.04.04

Summary

The experimental installation which allows to investigate composition materials, polymerizations, produced the method of polymerization in a low-frequency electric field, on extension, is presented. The technique of the experimental results treating is given. The high reliability of composition materials is shown.