

Н.А. Амирханова, Н.З. Гимаев*, А.Н. Зайцев, В.Н. Куценко, Н.И. Маркелова

ИССЛЕДОВАНИЕ КАТОДНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ПРИ ИМПУЛЬСНОЙ ЭХО СТАЛЕЙ ВИБРИРУЮЩИМ ЭЛЕКТРОДОМ-ИНСТРУМЕНТОМ

*Уфимский государственный авиационный технический университет
ул. К. Маркса 12, г. Уфа, 450025, Башкортостан, Россия
Предприятие “Новотэч”

Появление новых высокопрочных и твердых материалов, усложнение конструкции деталей и повышение технических требований к точности и качеству обрабатываемой поверхности стимулируют развитие и необходимость применения импульсной электрохимической обработки (ЭХО) вибрирующим электродом-инструментом (ЭИ) [1, 2].

Однако, в процессе ЭХО (при определенных сочетаниях параметров режима обработки) могут возникать физические или физико-химические состояния межэлектродной среды и поверхности электродов, при которых будет невозможно достижение заданных выходных технологических показателей.

Таким образом, возникают технологические ограничения процесса ЭХО. Примером таких ограничений являются образующиеся на поверхности ЭИ в процессе обработки катодные отложения [3–6].

Проблема катодных отложений (как нежелательного явления) может быть рассмотрена в следующих аспектах: физико-химическом, технологическом и организационно-производственном.

Физико-химический аспект заключается в том, что возникающие на поверхности ЭИ катодные отложения, во-первых, увеличивают электрическое сопротивление межэлектродного промежутка (МЭП) и соответственно повышают энергетические затраты на реализацию процесса и, во-вторых, изменяют электрохимические свойства поверхности ЭИ, оказывая влияние на характер анодного растворения детали.

В технологическом аспекте данная проблема состоит в следующем: во-первых, катодные отложения вызывают изменение размеров профиля ЭИ и не позволяют снизить погрешность формы, что важно для прецизионного (погрешность менее 10 мкм) электрохимического копирования; во-вторых, они сужают сечения, образующихся в боковом МЭП, каналов прокачки электролита, что делает невозможным выполнение ряда технологических операций, например, получение глубоких отверстий малого диаметра и узких пазов.

Организационно-производственный аспект обусловлен технической сложностью, а в ряде случаев невозможностью контроля величины отложений без прерывания процесса обработки, что не позволяет обеспечить стабильность выходных технологических показателей, особенно в условиях крупносерийного и массового автоматизированного производства.

Резюмируя вышеизложенное, можно сделать вывод, что изучение условий возникновения катодных отложений и разработка способов их оперативного контроля и удаления является актуальной проблемой.

В настоящее время известны различные способы устранения катодных отложений, которые по виду используемой энергии можно разделить на три группы: механические, химические и электрохимические.

Основные недостатки механических способов состоят в следующем: во-первых, для удаления отложений требуется прерывание процесса электрохимической обработки и не предусмотрен оперативный контроль за их образованием; во-вторых, возможно изменение размеров рабочего профиля ЭИ, что потребует дополнительных затрат на его восстановление.

Химические способы удаления отложений можно разделить на две категории. Первая категория охватывает способы устранения катодных отложений с помощью растворителей. Недостатком этой категории способов, так же, как и механических, является необходимость прерывания процесса обработки. В качестве рабочих жидкостей в них используются агрессивные и токсичные растворы. Вторая категория химических способов удаления отложений предполагает введение в электролит различного рода добавок [4]. Общим недостатком этих способов является сложность поддержания в реальных (производственных) условиях постоянного химического состава электролита при длительной обработке.

Решение данной проблемы возможно электрохимическим способом – с помощью биполярного тока [3, 4, 7, 8]. Однако в настоящее время не существует комплексного исследования данного способа, отсутствию научнообоснованные рекомендации по выбору состава электролита, материала ЭИ и параметров импульса биполярного тока, обеспечивающих высокопроизводительное удаление катодных отложений без растворения материала катода.

Настоящая работа посвящена выявлению закономерностей и раскрытию механизма образования катодных отложений при импульсной биполярной ЭХО сталей с целью разработки способа их эффективного удаления в условиях массового автоматизированного производства.

Методика экспериментальных исследований катодных отложений

Экспериментальные исследования проводились на универсальном электрохимическом копировально-прошивочном станке с вибрирующим ЭИ модели 4420Ф11, модернизированном для использования биполярного тока. Использовался электрод-инструмент (катод) из хромистой стали (40Х13). Заготовка (анод) представляла собой трубку диаметром 20 мм из хромистой стали 40Х13. В качестве электролита использовался 8% водный раствор нитрата натрия.

Схема подачи импульсов при биполярной обработке заключалась в следующем (рис. 1): периодически, в паузах между импульсами тока прямой полярности длительностью t_p , синхронизированными с вибрацией $S(t)$ ЭИ, подавались импульсы тока обратной полярности длительностью t_n .

Использовалась “прямая” схема подвода электролита в МЭП – через центральное отверстие в ЭИ (рис. 2,а). Конструкция технологической оснастки позволяла моделировать все типовые условия образования отложений в реальных условиях ЭХО.

В ходе исследований фиксировались значения величины (ширины – b_i , высоты – h_i , см. рис. 4, 7) и состава катодных отложений в зависимости от длительности процесса обработки.

Для определения качественного фазового состава катодных отложений использовался метод микрорентгеноспектрального анализа на электронном микроанализаторе модели JXA-6400. Глубина проникновения электронного луча составляла 3–5 мкм в зависимости от толщины исследуемых катодных отложений.

Униполярная обработка

В результате экспериментов установлено, что при униполярной ЭХО вибрирующим ЭИ на торцевой поверхности ЭИ в общем случае могут возникать четыре характерные зоны: $b1$, $b2$, $b3$ ($b3'$, $b3''$), $b4$ (рис. 2,б). При этом основная масса отложений возникает уже на первой минуте обработки (рис. 3, 4). С увеличением длительности обработки происходит начальный интенсивный рост объема (b_i , h_i) отложений с последующей их стабилизацией до некоторого установившегося значения (см. рис. 3, 4). С уменьшением величины МЭЗ интенсивность образования отложений возрастает.

Установлено, что увеличение амплитуды импульса напряжения прямой полярности U_{min} способствует уменьшению ширины катодных отложений в зоне $b3$ (рис.5). Причина этого заключается в перераспределении скоростей анодного растворения по длине МЭП. При этом высота катодных отложений $h3$ в указанной зоне напротив увеличивается, что может быть связано с увеличением концентрации продуктов анодного растворения.

Биполярная обработка

После биполярной обработки количество характерных зон отложений на катодной поверхности уменьшилось – зоны $b2$ и $b3$ объединились в одну и при визуальном исследовании (при увеличении в 500 раз) не отличались от основного металла.

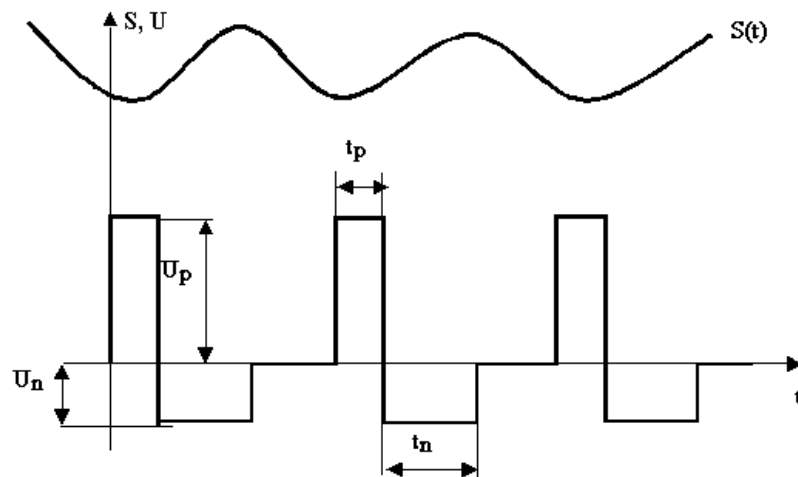


Рис. 1. Схема подачи импульсов прямого и обратного тока.

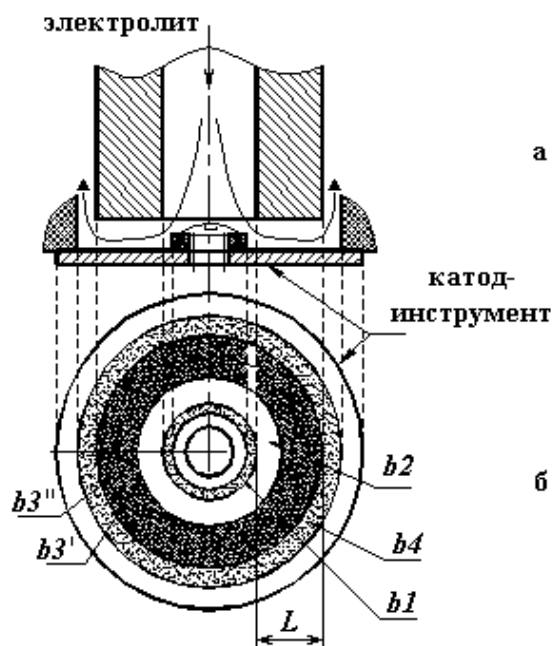


Рис. 2. Схемы подачи электролита (а) и расположения характерных зон отложений на поверхности катода (б).

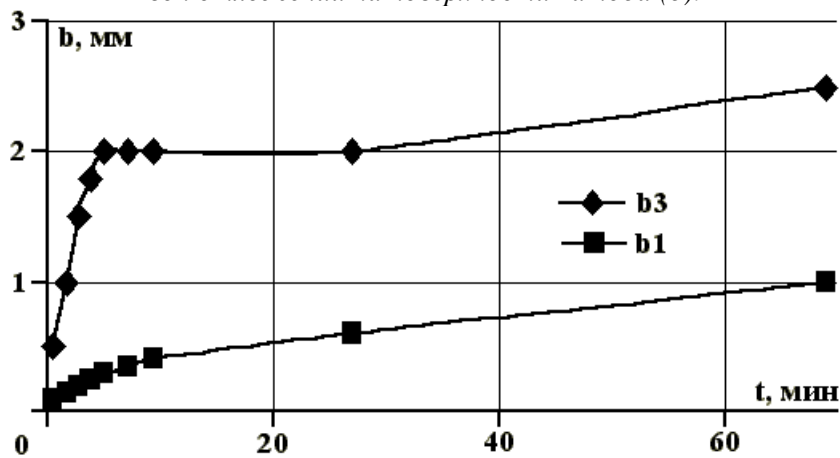


Рис. 3. Зависимость изменения ширины $b1, b3$ характерных полос при униполярной ЭХО от времени обработки t при: $S(t) \sim 20-30$ мкм; $U_{min} = 8$ В; $t_{имп} = 3,5$ мс; $P_{эл} = 100$ кПа; $T_{эл} = 16-18$ °С; электролит – $NaNO_3$; $\rho = 1,05$ г/см³.

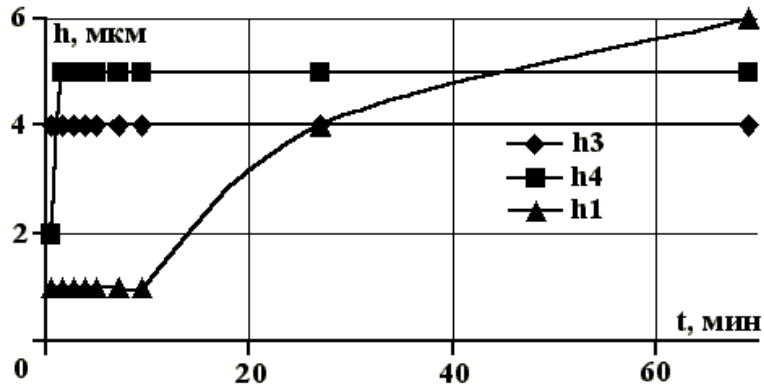


Рис. 4. Зависимость изменения высоты характерных полос h_1, h_3, h_4 при униполярной ЭХО от времени обработки t при: $S(t) \sim 20-30$ мкм: $U_{\min}=8$ В; $t_{\text{имп}}=3,5$ мс; $P_{\text{эл}}=100$ кПа; $T_{\text{эл}}=16-18$ °С; электролит – NaNO_3 ; $\rho=1,05$ г/см³.

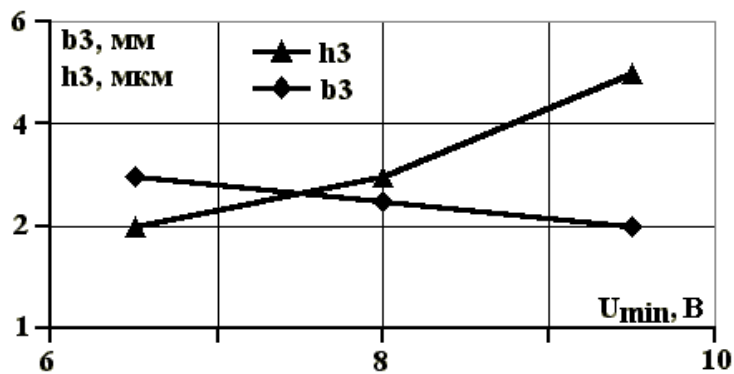


Рис. 5. Зависимость изменения ширины b_3 и толщины h_3 характерных полос катодных отложений при униполярной ЭХО от амплитуды импульса напряжения: U_{\min} : $t=300$ с; $t_{\text{имп}}=3,5$ мс; $P_{\text{эл}}=100$ кПа; $T_{\text{эл}}=16-18$ °С; электролит – NaNO_3 ; $\rho=1,05$ г/см³.

Общий характер изменения геометрических параметров отложений (ширины b_i и высоты h_i) во времени на стальном ЭИ аналогичен режиму униполярной обработки (рис. 6, 7). Количественная характеристика изменяется существенно: при биполярной обработке ширина зон b_1 , b_3 и высота зоны h_3 уменьшается в 2–2,5 раза. Между тем измерение высоты отложений в зонах b_1 и b_4 показало, что в этих зонах кристаллы выше, чем при униполярной обработке.

Рассмотрим характер изменения фазового и химического состава отложений по длине (L) МЭП для стального ЭИ в каждой из указанных зон (см. рис. 8).

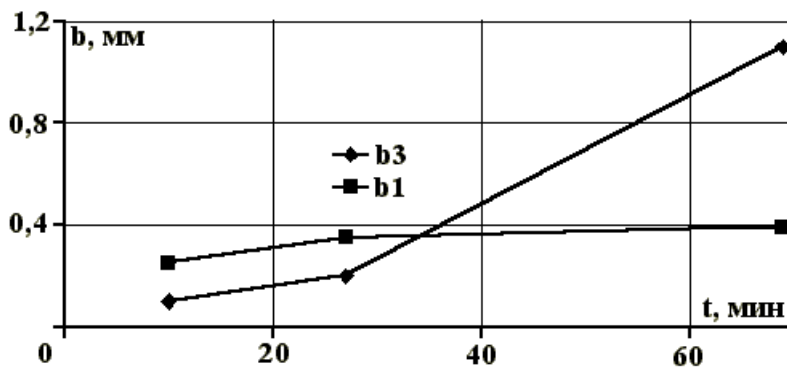


Рис. 6. Зависимость ширины b_1, b_3 характерных полос при биполярной ЭХО от времени обработки t при: $S(t) \sim 20-30$ мкм: $U_{\min}=8$ В; $t_{\text{имп}}=3,5$ мс; $P_{\text{эл}}=100$ кПа; $T_{\text{эл}}=16-18$ °С; электролит – NaNO_3 ; $\rho=1,05$ г/см³; $U_n=-0,5$ В; $t_n=0,4$ мс.

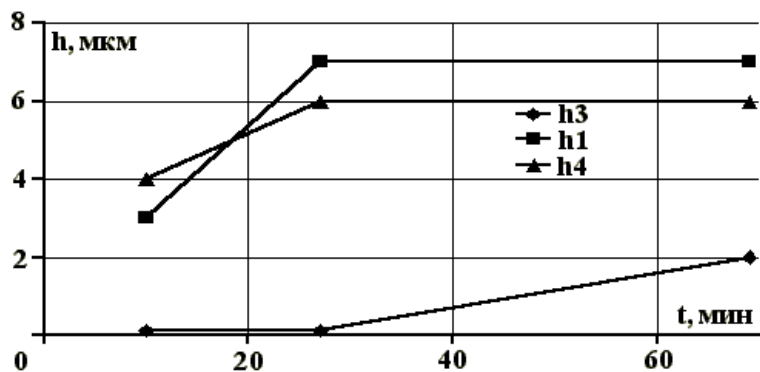


Рис. 7. Зависимость толщины характерных полос $h1$, $h3$, $h4$ при биполярной ЭХО от времени обработки t при: $S(t) \sim 20-30$ мкм; $U_{\min} = 8V$; $t_{\text{имп}} = 3,5$ мс; $P_{\text{эл}} = 100$ кПа; $T_{\text{эл}} = 16-18^\circ C$; электролит – $NaNO_3$; $\rho = 1,05$ г/см³; $U_n = -0,5$ В; $t_n = 0,4$ мс.

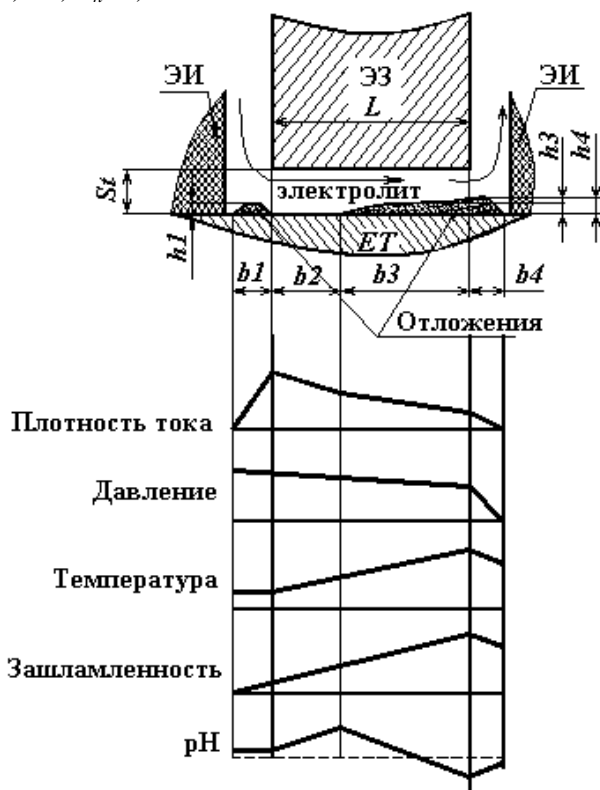
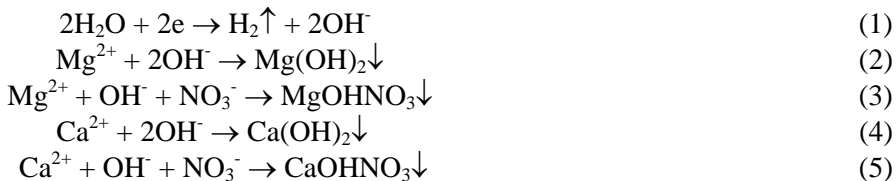


Рис.8. Схема прокачки электролита и изменения параметров электролита по длине МЭП.

Зона $b1$ представляет собой “застойную” зону, в которой скорость движения электролита близка к нулю. Ввиду того, что при приготовлении электролита (водного раствора нитрата натрия) использовалась техническая вода, содержащая ионы Ca^{2+} и Mg^{2+} , в прикатодном слое в щелочной среде образуются гидроксиды $Mg(OH)_2$, $Ca(OH)_2$ или их основные соли $MgOHNO_3$ и $CaOHNO_3$ по следующим реакциям:



При вибрации ЭИ эти соли также выбрасывались из торцевого МЭЗ (зоны $b2$ и $b3$) в зоны $b1$ и $b4$ с последующим осаждением на поверхности катода.

В зоне *b2* создавались наилучшие гидродинамические условия движения электролита и поэтому осаждения продуктов реакций не наблюдалось. В данной зоне реализуются наибольшие плотности тока (см. рис. 8), интенсивно выделяется водород, что способствует разрушению и отрыву отложений с поверхности электрода.

Плотность тока по длине МЭП распределяется неравномерно, так как по мере движения электролита происходит его зашламливание и увеличивается газонаполнение (рис. 8) и, как следствие, увеличивается электрическое сопротивление МЭП. Поэтому в зоне *b3* наблюдается значительное уменьшение плотности тока и снижение интенсивности выделения водорода на поверхности катода. В этой зоне создаются благоприятные условия для электрофоретического переноса заряженных частиц. Данный процесс является основой образования катодных отложений в зоне *b3*.

В результате микрорентгеноспектрального анализа отложений в зонах *b1–b4*, полученных на стальном катоде после униполярной обработки, было установлено, что в их составе во всех зонах находятся оксиды железа (FeO , Fe_2O_3), хрома (CrO_3), магния (MgO), кальция (CaO), никеля (NiO). Установлено, что качественный фазовый состав отложений в каждой зоне одинаков, отличие заключается лишь в количественном и процентном составе каждой из компонент (табл.1).

Результаты рентгеноспектрального анализа отложений на стальном катоде после биполярной обработки показали, что в зоне *b3''* наблюдается существенное (в 7 раз) снижение содержания оксида железа (с 77,56 до 11,63%) и повышение содержания оксида хрома (с 20 до 62%). В зонах *b2* и *b3'* катодные отложения отсутствуют. Снижение концентрации оксида железа в зоне *b3''* обусловлено тем, что при биполярной обработке образуется кислая среда, которая способствует химическому растворению гидроксида железа. Высокий процент содержания оксида хрома в поверхностном слое после биполярной обработки дает основание предположить, что зона *b2* покрыта чрезвычайно тонкой пленкой из CrO_3 (96%), в зонах *b3'* и *b3''* толщина этой пленки снижается (см. таблицу).

*Относительный (%) фазовый состав основных компонент катодных отложений в торцевом МЭП(зоны *b2* и *b3*) на стальном ЭИ при униполярной и биполярной ЭХО стальной заготовки*

| Фазовый состав | <i>b2</i> | | <i>b3'</i> | | <i>b3''</i> | |
|-------------------------|-----------|--------|------------|--------|-------------|--------|
| | унип. | бипол. | унип. | бипол. | унип. | бипол. |
| Fe_2O_3 | 72,23 | 0,0 | 72,07 | 14,19 | 77,56 | 11,63 |
| CrO_3 | 17,30 | 96,04 | 18,44 | 75,80 | 20,01 | 61,92 |
| CaO | 3,37 | 3,61 | 7,19 | 5,51 | 4,31 | 4,72 |
| MgO | 5,01 | - | 0,6 | - | 0,85 | - |
| SiO_2 | 1,05 | - | 0,69 | - | 1,01 | - |
| Fe_3O_4 | 0,91 | 0,18 | 0,29 | 2,06 | 0,19 | 1,65 |
| FeO | - | 0,17 | - | 1,28 | - | 10,47 |

Механизм образования и удаления катодных отложений при биполярной ЭХО

Остановимся более подробно на механизме образования и удаления катодных отложений при биполярной ЭХО. Известно, что в водных растворах солей при ЭХО сталей, входящие в их состав металлы (Fe , Ni , Al , Ti , Cr) ионизируются и при попадании в щелочной раствор в прикатодном слое образуют оксиды, гидроксиды и основные соли типа $\text{Fe}(\text{OH})_3$, $\text{Cr}(\text{OH})_3$, $\text{Ni}(\text{OH})_2$, $\text{Al}(\text{OH})_3$, $\text{FeOH}(\text{NO}_3)_2$, $\text{Fe}(\text{OH})_2\text{NO}_3$. В дальнейшем они образуют положительно заряженные коллоидные гранулы типа $[\text{m Fe}(\text{OH})_3 \text{ n Fe}^{3+} (\text{n-x}) \text{OH}]^{z+}$ (рис. 9) по следующим реакциям



В дальнейшем они выделяются из электролита в виде частиц новой фазы – катодных отложений в виде порошка, хлопьев и т.д. Определяющую роль здесь играют: электрофоретический перенос положительно заряженных частиц (коллоидных гранул) и их адсорбция со специфической адгезией к поверхности катода [4].

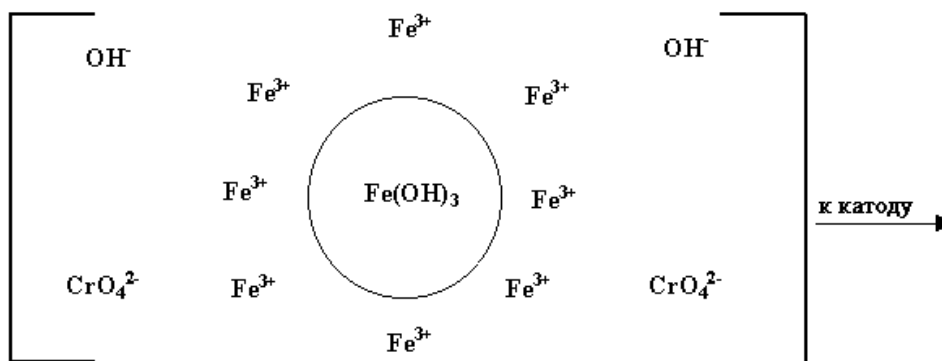


Рис. 9. Схема коллоидной гранулы гидроксида железа.

Коллоидный раствор гидроксида железа $\text{Fe}(\text{OH})_3$ имеет развитую поверхность, в порах его адсорбируются ионы хромата CrO_4^{2-} , которые идентифицируются на электронном микроанализаторе микрорентгеноспектральным анализом, как CrO_3 . При смене направления тока на катоде начинается анодный процесс, который сопровождается бурным выделением кислорода по реакции:



Выделение кислорода способствует отслаиванию отложений и созданию кислой среды, pH которой достигает 1–2. В кислой среде гидроксид железа $\text{Fe}(\text{OH})_3$, электрофоретически осажденный на катоде при прямой полярности импульса тока, химически растворяется, а оксид хрома CrO_3 переходит в хорошо растворимый бихромат ион, по реакциям:



Таким образом, в результате химического растворения катодных отложений (зоны *b2* и *b3*) в кислой среде достигается эффективная очистка торцевой поверхности ЭИ. Однако необходимо отметить, что в зонах *b1* и *b4* растворение катодных отложений происходит менее эффективно, поскольку здесь для химического растворения отложений создается недостаточно низкое значение pH.

Основным недостатком данного способа удаления катодных отложений является возможность растрова поверхности ЭИ. В этой связи, напряжение обратной полярности на электродах необходимо устанавливать таким максимально возможным, чтобы обеспечить протекание в прикатодной области только химических реакций.

Исследование различных схем биполярной обработки

Рассматривались следующие схемы приложения импульса обратной полярности:

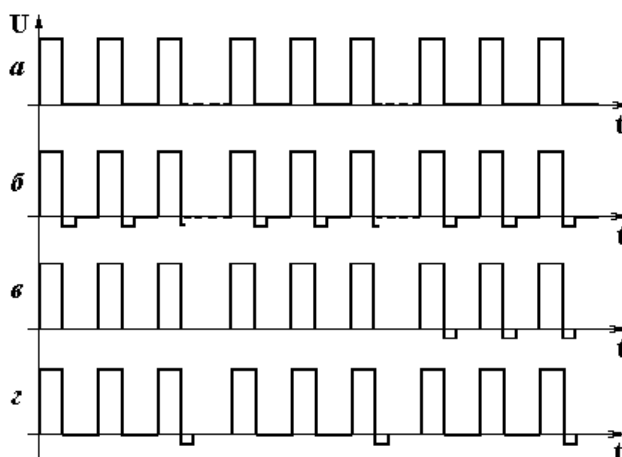


Рис. 10. Схемы импульсов тока прямой и обратной полярности при биполярной ЭХО.

Униполярная обработка (для сравнения) (рис. 10,а); биполярная импульсная – подача заданного импульса обратной полярности после каждого импульса прямой полярности в течении всей обработки (рис. 10,б); пошаговая: 1 шаг – униполярная обработка на заданную глубину, 2 шаг – завершающая биполярная обработка (рис. 10,в); циклическая: чередование групп униполярных

импульсов и групп биполярных импульсов в течение всей обработки; завершение обработки группой биполярных импульсов (рис. 10,з).

Установлено, что наиболее эффективная схема биполярной обработки – циклическая (рис. 11-4). Она (в рассматриваемых условиях) обеспечивала более полное удаление катодных отложений без растрыва рабочей поверхности ЭИ.

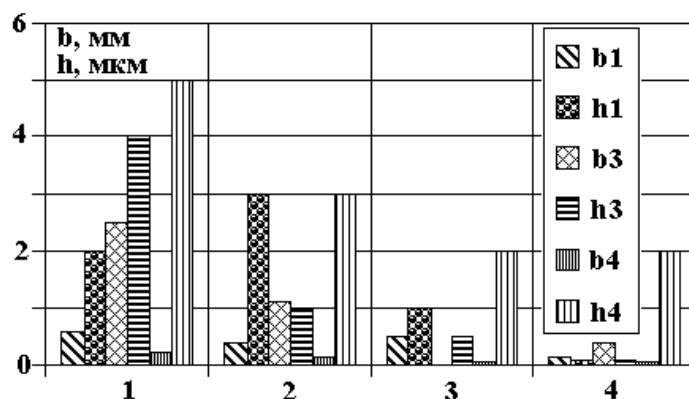


Рис. 11. Зависимость изменения ширины b_i и толщины h_i характерных полос в зависимости от принятой схемы биполярного тока:

1 – униполярная обработка; 2 – биполярная импульсная $U_n=0,1B$, $t_n=0,4$ мс; 3 – пошаговая: униполярная + 10 с при $U_n=0,8B$, $t_n=2$ мс; 4 – циклическая: униполярная – 1 мин, биполярная 3 с при $U_n=0,1B$; $U_{min}=8B$; $t=600$ с; $t_i=3,5$ мс; $P_{эл}=100$ кПа; $T_{эл}=16-18$ °С; электролит – $NaNO_3$; $\rho=1,05$ г/см.³

Выводы

1. Выявлены особенности образования катодных отложений по длине тракта прокатки электролита в МЭП при униполярной и биполярной ЭХО вибрирующим ЭИ. Установлено, что при униполярной ЭХО на поверхности ЭИ образуются четыре характерные зоны, обусловленные различным сочетанием плотности тока и гидродинамических параметров потока электролита. Подтверждена гипотеза о том, что возникновение отложений при униполярной обработке обусловлено электрофоретическим переносом положительно заряженных гранул к поверхности ЭИ, где они адсорбируются и адгезионно связываются с поверхностью катода.

2. Обоснован механизм удаления катодных отложений при биполярной ЭХО. Установлено, что при подаче обратного импульса тока происходит закисление (до pH=1–2) прианодной области, достаточное для химического растворения катодных отложений. Таким образом, установлено эффективное воздействие биполярной обработки на стальной катод, в результате которой поверхностные пленки гидроксидов в кислой среде химически растворяются, и катод (без изменения геометрии и физико-химических свойств рабочей поверхности) можно многократно использовать в массовом автоматизированном производстве.

3. Установлено, что с увеличением длительности униполярной обработки происходит стабилизация геометрических размеров и фазового состава катодных отложений. При этом основной объем отложений формируется уже в первые 1–5 минут обработки.

4. Показано на основе микрорентгеноспектрального анализа катодных отложений на стальном катоде после униполярной обработки, что в пленке на торцевой поверхности ЭИ преобладают оксиды железа (Fe_2O_3) и хрома (CrO_3), а вне зоны обработки в большей степени находятся оксиды кальция (CaO) и магния (MgO).

ЛИТЕРАТУРА

1. Зайцев А.Н., Гимаев Н.З., Безруков С.В. и др. Технология и оборудование для прецизионной электрохимической размерной обработки. М., 1990.
2. Зайцев А.Н., Белогорский А.Л., Агафонов И.Л. и др. Прецизионная электрохимическая многоэлектродная прошивка отверстий в стальной фольге // Труды 12-го международного симпозиума по электрическим методам обработки. Германия, Аахен, 1998. С. 555–564.

3. Давыдов А.Д., Козак Е. Высокоскоростное электрохимическое формообразование. М., 1990.
4. Кащеев В.Д., Малофеева А.Н. Влияние условий электролиза на формирование катодных пленок при электрохимической обработке углеродистых сталей // Электродные процессы и технология электрохимического формообразования. Кишинев, 1987.
5. Flerenbrock F., Zerckle R.D., Torp J.E. Checking the one-dimensional model of a two-phase flow with a frontal gap at ECM // Proceedings of the American Society of Mechanics Engineers. Series B. Machinery Design and Construction. 1976. № 2.
6. Mohanta S., Fahidy T.Z. // Elektrochim. Acta. 1974. Vol. 19. P. 771–775.
7. Мороз И.И. Электрохимическая обработка металлов. М., 1969.
8. Маэда С. Методы электрохимической обработки // Кикай то кочу. 1963. Т. 7. № 9.

Поступила 20.10.2000

Summary

Peculiarities of the cathode deposits forming along the length of the electrolyte pumping channel in impulse ECM of steels at the unipolar and the bipolar ECM have been discovered. It is ascertained that at the unipolar ECM four characteristic zones on the ET surface are formed. These zones are determined by a different combination of the current density and the hydrodynamic parameters of the electrolyte flow. A hypothesis is proved, that the cathode deposits are caused by electrophoretical transfer of positive charged granules to the ET (electrode-tool) surface where they are adsorbed and adhesively connected with the cathode surface. A mechanism of the cathode deposits removal at the bipolar ECM has been revealed. It has been established that at the current inverse pulse apply an acidation (to pH = 1,2) of the anode-side area occurs, that is sufficient for chemical dissolving of the cathode deposits. Thus, an effective influence of the bipolar machining on a steel cathode has been ascertained. This influence results in chemical dissolving of hydroxide sheet in an acid medium, that provides the cathode being used repeatedly in a quantity automated production (without geometric, physical and chemical changes of the work surface). It has been showed that as the time of the unipolar machining increases the geometric dimensions and the phase composition of the cathode deposits are stabilized. At that the main volume of the deposits is formed during the first 1–5 minutes of processing.

В.А. Тимощенко, Е.В. Голдыш

**НАНЕСЕНИЕ ПОКРЫТИЙ НА МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ ПОВЕРХНОСТИ,
РАБОТАЮЩИЕ В УСЛОВИЯХ УСТАЛОСТНОГО ИЗНАШИВАНИЯ**

*Опытный завод Института прикладной физики,
ул. Миорица, 5, г. Кишинев, МД-2028, Республика Молдова*

Высокая эффективность от нанесения упрочняющих покрытий на металлические поверхности может быть обеспечена только при условии решения двуединой задачи: приведение технической системы в функциональное равновесие и избирательное формирование на взаимодействующих поверхностях слоев, хорошо противостоящих разрушению или зарождению и развитию трещины разрушения конструкции [1].

В условиях многократных воздействий при дискретном касании поверхностей происходит постепенное накопление механических повреждений, приводящих к усталостному разрушению деформируемой зоны [2]. С позиций феноменологической теории разрушения под усталостным разрушением поверхностного слоя материала следует понимать отделение частиц в результате исчерпания ресурса его пластичности при многократном деформационном воздействии.

Поскольку при силовом взаимодействии реализуется поверхностное пластическое деформирование, то обобщенный очаг деформации для модели жесткопластического тела имеет вид, показанный на рис. 1. При движении закругленного контртела по поверхности материальная частица 1, пересекая границу перемещающегося очага *abcdca*, получает деформацию сдвига

$$\Delta \varepsilon'_i = \Delta v'_\tau / v'_n$$

при показателе схемы напряженного состояния $\sigma'_i / \tau_i = -1$, которая нарастает по мере приближения к противоположной границе, а при ее переходе вновь получает существенное приращение

$$\Delta \varepsilon''_i = \Delta v''_\tau / v''_n = 2 / \sqrt{(1 - \mu^2)} \text{ при } \sigma''_i / \tau_i = -5,71 + \arccos 2\mu,$$

где Δv_τ – разрыв касательной составляющей скорости материальной частицы при переходе через жесткопластическую границу в зонах 1 и 2; v_n – нормальная составляющая скорости в этих зонах; σ_i, τ_i – среднее нормальное напряжение и интенсивность касательных напряжений ($\tau_i = k$) в соответствующей зоне (1 или 2); k – сопротивление деформируемого материала сдвигу; μ – коэффициент внешнего трения, $0 \leq \mu \leq 0,5$.

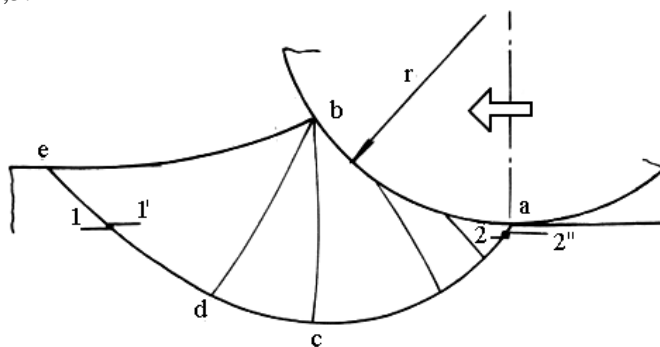


Рис. 1. Очаг деформации при скольжении цилиндрического выступа по поверхности жесткопластического тела.

Путь исчерпания ресурса пластичности для материальной частицы, прошедшей от зоны 1 до зоны 2, показан на рис. 2. Здесь приведена диаграмма пластичности [3], показывающая зависимость предельной деформации сдвига ε_{np} от показателя схемы напряженного состояния σ_i/τ_i , путь нарастания деформации $\Delta\varepsilon_i$ и исчерпание ресурса пластичности $\Delta\varphi_i$.

При определении исчерпания ресурса пластичности

$$\Delta\varphi_i = \Sigma(\Delta\varepsilon_i/\varepsilon_{npi}),$$

(ε_{npi} – предельно допустимая деформация при реализующейся схеме напряженного состояния) зависимость φ_i от ε_i полагали линейной. Тогда графическое построение в левой части рис. 2 отразит степень исчерпания ресурса пластичности (при $\varphi=1$ пластичность металла полностью исчерпана) за один деформирующий проход контртела по взаимодействующей поверхности. Кроме того, в зонах интенсивной локальной деформации получается приращение температуры до величин, вызывающих фазовые изменения в металле. Это приводит к изменению механических свойств металла в поверхностном слое (ε_{np} уменьшается).

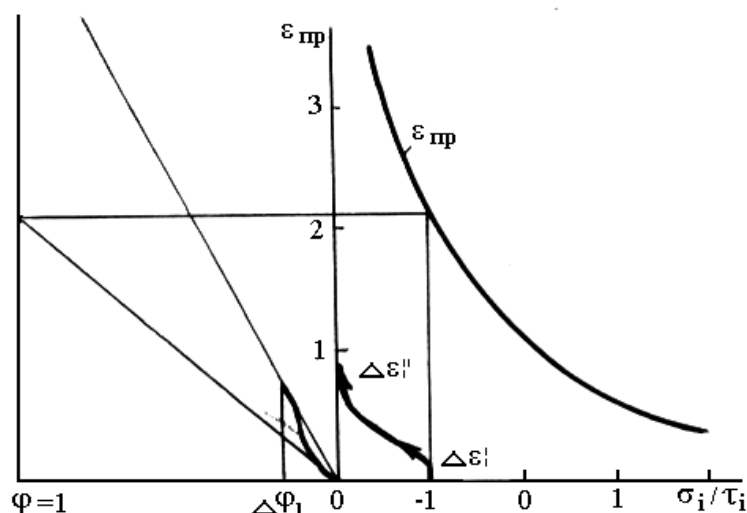


Рис. 2. Схема исчерпания ресурса пластичности деформируемого материала.

Повторные проходы увеличивают степень исчерпания ресурса пластичности

$$\varphi = \Delta\varphi_1 + \Delta\varphi_2 + \dots + \Delta\varphi_n = \sum_{j=1}^n \Delta\varphi_j$$

($\Delta\varphi_i$ – исчерпание ресурса пластичности за один проход) и по достижении условия $\sum_{j=1}^n \Delta\varphi_j = 1$

происходит отделение частиц поверхностного слоя взаимодействующей детали. При циклическом нагружении материальные частицы проходят через зоны разной жесткости схемы напряженного состояния (σ_i/τ_i изменяется от -1 до -4).

При взаимодействии поверхностей, отличных от принятой модели жесткопластического тела, очаг деформации более развит в глубину [4]. Пластическое течение (рис. 3) наблюдается внутри области Σ : граница области разделяет зоны пластической и упругой деформации. Глубина очага пластической деформации H связана с глубиной вдавливания контртела зависимостью

$$H = h / (0,1 + 0,5h/r),$$

где r , h – радиус и глубина вдавливания закругленного выступа.

Для случая скольжения клина, показанного на рис. 3, $H \approx 5,5h$. В этом случае не наблюдается явно выраженной локализации интенсивной деформации как в случае, приведенном на рис. 1, что позволяет выдерживать значительно большее число ступеней деформации до появления шелушения (повышение шероховатости из-за отделения частичек металла). Естественно, что после начала шелушения деформация становится менее устойчивой и локализуется в образовавшихся отдельных выступах. При этом наблюдаются очаги деформаций, подобные тем, которые приведены на рис. 1 и 3, а исчерпание ресурса пластичности металла поверхностного слоя описывается зависимостью

$$\varphi = \sum_{i=1}^m \Delta\varphi_i,$$

где $\Delta\varphi_i$ – исчерпание ресурса пластичности при отдельном деформирующем взаимодействии с рассматриваемой зоной.

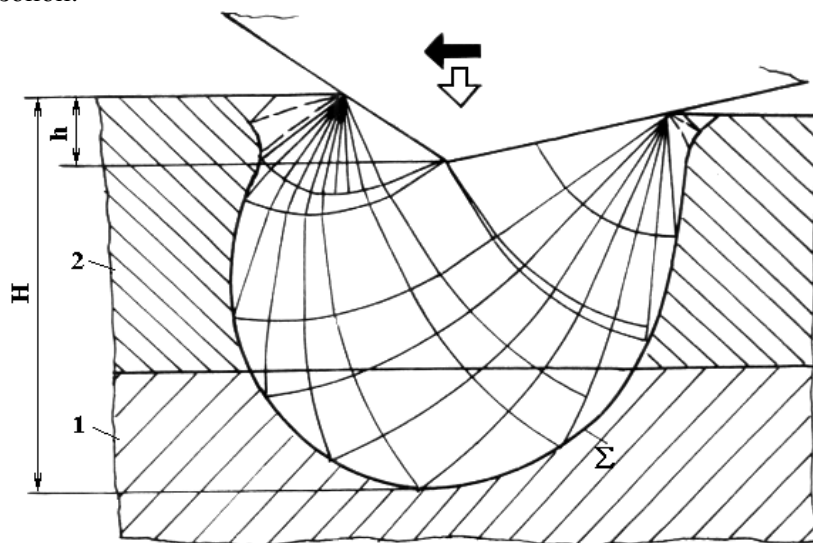


Рис. 3. Форма очага упругопластической деформации при скольжении контртела по металлической поверхности.

Наиболее предпочтительными, способствующими повышению износостойкости, были бы схемы упругопластического деформирования, при которых пластические деформации рассредоточены в больших объемах поверхностного слоя, чем в схемах, подобных показанной на рис. 1. Это условие можно реализовать при уменьшении глубины вдавливания контртела h . Для этого надо увеличить площадь местного контакта поверхностей, снизить усилие вдавливания и коэффициент внешнего трения. Важным является формирование на взаимодействующих поверхностях слоев с рельефом в форме шаровых сегментов и сопротивлением пластическому сдвигу k_n , близкому по величине к k_0 основного материала. Второй, более тонкий слой должен быть из материала с $k_{n2} \leq k_{n1}$ и крутой диаграммой пластичности в области мягких схем напряженного состояния, то есть в области с $\sigma_i/\tau_i \leq -1$. Это свойственно никелю, цинку, некоторым медным сплавам, алюминиевым сплавам. Тогда взаимодействующие поверхности будут испытывать деформации, подобно показанным на рис. 3.

На границе раздела слоев 1 и 2 при существенном различии сопротивления сдвигу k_n и k_0 линии скольжения будут получать дополнительный поворот. Это приводит к появлению на границе раздела разрывов нормальных напряжений $[\sigma_\perp]$, увеличивающихся с ростом отношения k_n/k_0 , что создает предпосылки к разрушению пограничных слоев. Поэтому надо наносить покрытия толщиной $t_n \approx H$ при соблюдении условия $k_n \approx k_0$, но с обеспечением более высокой допустимой пластической деформацией у покрытия (крутая диаграмма пластичности в областях мягких схем напряженного состояния) и плавного перехода между слоями, к примеру, за счет диффузионных процессов, чем достигается высокая несущая способность поверхностного слоя в процессе эксплуатации конструкции. Нанесение сверху тонкого слоя с $k_{n2} < k_{n1}$ способствует увеличению протяженности очага пластического течения в верхнем слое. Теоретический анализ деформирования тонкого поверхностного слоя и экспериментальные исследования изменения шероховатости поверхности от деформирующей нагрузки и числа циклов нагружения показывает, что при этом слой способен выдерживать более высокие нагрузки при большем числе воздействий без их шелушения.

Учитывая требования к покрытиям и то, что их надо наносить на отдельные, часто небольшие, участки поверхности, следует отдать предпочтение электроэрозионному легированию. При этом имеется возможность избирательно наносить покрытия на участки поверхности с учетом реальной схемы взаимодействия, назначая соответствующие материалы электродов и режимы легирования [1]. Когда требуется восстановление изношенных поверхностей, целесообразно наносить восстанавливающий слой, к примеру, гальваническим хромированием с последующим местным легированием. В случае восстановления гильз цилиндров двигателей внутреннего сгорания в зонах верхнего и нижнего крайних положений компрессионного кольца на хромированную поверхность наносили слой

электроэрозионным легированием на мягких режимах. Затем зону с медным покрытием подвергли алмазному выглаживанию. Это обеспечивает резкое снижение износа гильз.

Подобный подход использовали для других пар деталей, работающих в условиях возвратно-поступательного движения, что обеспечивало повышение долговечности не менее, чем в два раза.

Выводы

Для снижения интенсивности усталостного изнашивания, являющегося следствием местного истощения ресурса пластичности, надо обеспечивать схемы взаимодействия, при которых преобладает упругопластический контакт металлических поверхностей и наносить двухслойные покрытия с сопротивлением сдвигу, близким к сопротивлению сдвигу основного металла, но с более высокой допустимой деформацией до разрушения. Более пластичный поверхностный слой надо наносить электроэрозионным легированием избирательно с последующей обработкой поверхностным пластическим деформированием.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тимошенко В.А. Повышение ресурса деталей машин и технологической оснастки. Кишинев, 1995.
2. Крагельский И.В. Развитие науки о трении, износе и смазке твердых тел – трибоники // Словарь - справочник по трению, износу и смазке деталей машин. Киев, 1979. С. 5-10.
3. Колмогоров В.Л. Напряжения, деформации, разрушение. М., 1970.
4. Тимошенко В.А. Скольжение единичной неровности по деформируемой заготовке // Изв. АН МССР. Физика и техника. 1990. № 2. С. 44-47.
5. Тимошенко В.А. Пластическое взаимодействие деформируемой заготовки и выступов шероховатой поверхности инструмента // Трение и износ. 1994. Т.15. № 3. С. 440-445.

Поступила 08.09.2000

Summary

It is ground researches of legitimacies of surface plastic deforming and exhaustion of resource of a plasticity of metal at interplay of conjugated surfaces the route of increase of resistance to their fatigue failure are established.

А.В. Рыбалко*, Д.М. Гричук*, Orhan Sahin**

ЭЛЕКТРОИСКРОВОЕ ЛЕГИРОВАНИЕ ОСЦИЛЛИРУЮЩИМ ПО ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛИ ОБРАБАТЫВАЮЩИМ ЭЛЕКТРОДОМ

**Институт прикладной физики АН РМ,
ул. Академией, 5, г. Кишинев, МД-2028, Республика Молдова,
**Institute of Technology, 141, Gebzel/Kocaeli, 4140, Turkey*

Непременным атрибутом установок для электроискрового легирования (ЭИЛ) являются электромагнитные вибраторы или другого типа устройства, осуществляющие периодическое контактирование обрабатываемого электрода с деталью [1]. При этом, либо при их сближении, либо в момент контактирования (зависит от типа использования генератора тока) формируется искровой канал. Как было показано ранее [2, 3], использование подобного типа систем коммутирования электрических разрядов оказывает существенное влияние на технологические показатели процесса ЭИЛ (при работе на режимах с энергией импульсов 0,5 Дж и ниже), в частности, снижает производительность. Напомним кратко основные факторы, определяющие потерю производительности установок подобного типа:

© Рыбалко А.В., Гричук Д.М., Sahin Orhan, Электронная обработка материалов, 2001, № 2, С. 16–21.

– уменьшение интегральной электрической мощности, выделяемой в межэлектродном промежутке за единицу времени по мере перехода к прецизионным режимам в связи с невозможностью компенсировать ее потерю повышением частоты следования импульсов (частота жестко задается вибратором и остается неизменной);

– уменьшение доли энергии, идущей на искровой разряд за время единичного импульса, в связи с шунтированием искрового канала соударяющимися электродами по мере их сближения после контакта; только часть импульса тока сопровождается искровым разрядом, остальная часть выделяется в короткозамкнутом контуре разрядной цепи генератора после металлического контакта электродов;

– уменьшение количества импульсов с наличием искрового разряда (увеличение количества импульсов при полном коротком замыкании электродов) из-за недостаточности величины электрической энергии в них для взрыва объема контактирующих микронеровностей электродов и последующего формирования искрового канала.

На наш взгляд, с целью раскрытия новых возможностей способа ЭИЛ, в частности, при проведении процесса в режиме с токами 20–30 А в амплитуде, необходимо отказаться от общепринятой концепции формирования искрового канала периодически соударяющимися электродами. Электродная система должна обеспечивать возможность подачи импульса в любой момент времени и при этом не шунтировать искровой канал при его развитии. Аналогом таких систем могут быть уже широко применяемые в практике ЭИЛ дисковые электроды с вращением, устройства с осевым вращением электродов и др. Как нам представляется, одно из устройств подобного типа может быть реализовано путем создания условий формирования искрового канала путем взрыва контактирующих микронеровностей электрода и детали при осциллировании (скольжении) обрабатываемого электрода по поверхности детали [4].

Данная работа посвящена экспериментальной проверке способа ЭИЛ при осцилляции электрода-анода вдоль обрабатываемой поверхности, при котором формирование искрового канала осуществлялось за счет взрыва контактирующих микронеровностей.

Движение обрабатываемого электрода по поверхности детали осуществляли с помощью типового вибратора от установки “ЭЛИТРОН-22А” с измененным электрододержателем. Осцилляция электрода осуществлялась по поверхности обрабатываемой детали, а не по нормали к ней. Частота вибрации 100 Гц, амплитуда вибрации поддерживалась постоянной в течение всех экспериментальных работ. Легированию подвергались образцы из стали У8. Каждая точка на кривых является результатом обсчета данных измерений, полученных при обработке как минимум трех образцов. Площадь обработки составляла 2 см². Использовались обрабатывающие электроды из материала ВК8 сечением 8,8 мм². Изменение массы электродов и образцов оценивалось с помощью аналитических весов АДВ – 200 М с точностью 0,0001 г. В целях снижения вклада субъективного фактора на полученные результаты при легировании образцов был изготовлен специальный стенд, на котором был смонтирован держатель вибрационного устройства с противовесом, а также механизм обеспечивающий автоматическое перемещение образца.

В качестве источника импульсного тока использовался лабораторный широкодиапазонный транзисторный генератор, обеспечивающий импульсы по форме, близкие к треугольной. В работе применялись три режима легирования с соответствующими энергиями в импульсах: первого режима – 0,035 Дж (длительность тока у основания 140 мкс, амплитуда тока – 75 А), второго режима – 0,23 Дж (длительность импульса у основания 220 мкс, амплитуда тока – 250 А). Потребляемая установкой мощность при легировании на втором и третьем режиме поддерживалась постоянной подбором частоты следования импульсов и составляла 150 Вт. На первом режиме такую мощность реализовать не удалось, поскольку для обеспечения заданной сплошности формируемого покрытия пришлось уменьшить сечение обрабатываемого электрода с 8,8 до 3,14 мм². В данном случае эта мощность составила 100 Вт.

На рис. 1 представлены кривые, характеризующие убыль массы анода и привес массы детали (образца) для указанных режимов обработки. Здесь кривые 1э, 2э, 3э – убыль обрабатываемого электрода по режимам соответственно, кривые 1д, 2д, 3д – соответствующий им привес детали. Как видно, в описанных экспериментальных условиях перегиб в кривой привеса детали, характерный для процесса ЭИЛ [1], не наблюдается. При этом удельная производительность процесса нанесения, под которой будем понимать привес детали в единицу времени на единице площади и рассчитанной из данных, взятых на прямолинейном участке кривой (в нашем случае время 3 минуты), составляет для второго режима 8,7 мг/мин·см², для третьего – 10,5 мг/мин·см². И это при потребляемой мощности

150 Вт. Если взять для сравнения эти же данные для самого грубого режима установки “Элитрон – 22А” (установочная мощность по грубому режиму – 250 Вт, в более ранних установках и выше), то они составляют $7,3 \text{ мг/мин} \cdot \text{см}^2$ [2].

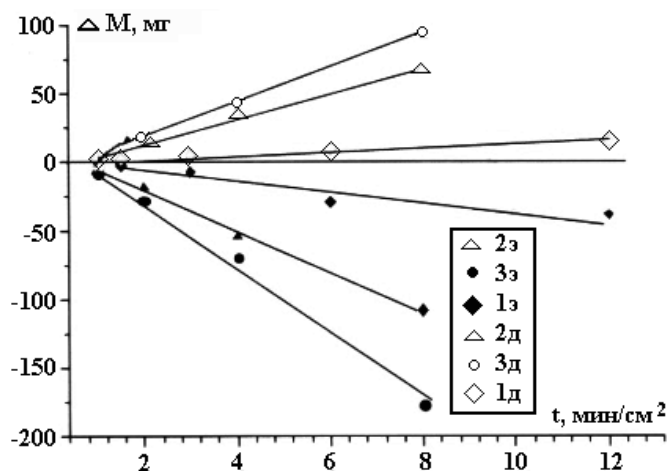


Рис. 1. Зависимость изменения масс обрабатывающего электрода (1э-3э) и детали (1д-3д) от времени обработки для различных электрических режимов электроискрового легирования.

Как видно из этого же рисунка, производительность для второго и третьего режимов обработки разная (у третьего режима – большая), несмотря на равенство затрачиваемой на процесс электрической мощности. Возможно, это связано с нелинейностью зависимости выброса массы электрода и величины энергии импульса. Для выравнивания производительности, необходимо по мере ухода в прецизионную область повышать мощность, идущую на процесс за счет увеличения частоты следования импульсов.

В соответствии с полученными данными достигнутая удельная производительность легирования на первом режиме составила $1,4 \text{ мг/мин} \cdot \text{см}^2$. Ее можно существенно повысить путем повышения частоты следования импульсов при одновременном увеличении сечения обрабатывающего электрода. Но целесообразность этого требует экспериментальной проверки в связи с трудностью обработки поверхности при большем соотношении площади сечения обрабатывающего электрода и площади эрозионного пятна от единичного импульса столь малой энергии.

В этой же работе проводилась обработка в более прецизионном режиме за счет снижения амплитудных значений тока до 30–20 А в импульсе при соответствующем уменьшении его длительности. Но при таких электрических параметрах импульса доля коротких замыканий в общем числе импульсов резко увеличилась, что связано с малой в условиях эксперимента скоростью нарастания тока в импульсе ($2,5 \text{ А/мкс}$) и, соответственно, отсутствием условий для формирования искрового канала взрывом контактирующих микронеровностей; при такой скорости ввода энергии и за столь короткое время ее выделения не успевают взорваться контактирующие микронеровности. Впоследствии нам удалось решить эту проблему и довести производительность легирования до $4,4 \text{ мг/мин} \cdot \text{см}^2$ и более. Существует реальная возможность формирования поверхности с шероховатостью по параметру Ra менее, чем 1 мкм. Такой технологический процесс крайне необходим при упрочнении деревообрабатывающего инструмента.

Оценивая производительность процесса ЭИЛ, нельзя не подчеркнуть данные о коэффициенте переноса материала, под которым понимается отношение величины массы, перенесенной на деталь, к величине убыли массы обрабатывающего электрода. При этом он подразделяется на абсолютный и относительный. Первый отражает отношение полученной к данному моменту за все время легирования массы детали к соответствующей убыли обрабатывающего электрода. Второй – отношение массы детали, полученной только за отрезок времени от предыдущего контроля масс к моменту текущего контроля к соответствующей убыли массы обрабатывающего электрода. На рис. 2 и 3 представлены зависимости, характеризующие изменение описанных коэффициентов переноса, рассчитанных из приведенных выше данных (рис. 1). Как видно, кривые обсуждаемых зависимостей для всех режимов легирования являются восходящими с наличием максимума. Сопоставив по времени эти участки кривых и ход кривых убыли массы обрабатывающего электрода из рис. 1, кривые 1э-3э, видим, что расход материала во времени при этом неизменный для каждого из

режимов легирования. Следовательно, в этом промежутке времени наряду с переносом материала с обрабатываемого электрода имеет место и эрозия материала детали, различная во времени для каждого из режимов легирования. Грубый режим даже имел отрицательный привес в первой контрольной точке, поэтому коэффициенты переноса для этой точки лишены смысла, что и отражено на графиках. В целом это говорит о недостоверности методики оценки эффективности процесса легирования на начальном его этапе с помощью коэффициентов переноса.

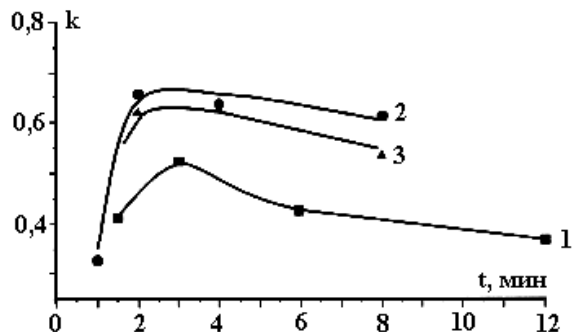


Рис. 2. Зависимость абсолютного коэффициента переноса материала электрода на деталь от времени обработки для различных электрических режимов электроискрового легирования. 1 – прецизионный; 2 – средний; 3 – грубый.

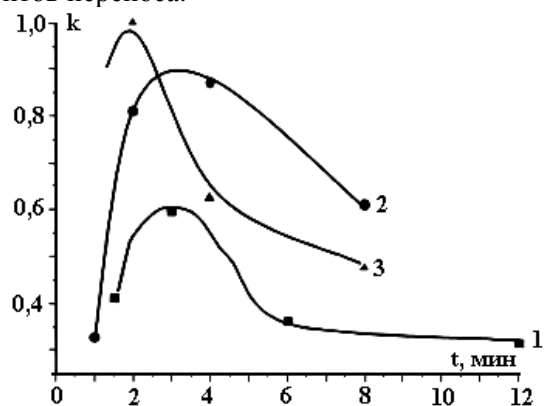


Рис. 3. Зависимость относительного коэффициента переноса материала электрода на деталь от времени обработки для различных электрических режимов электроискрового легирования. 1 – прецизионный; 2 – средний; 3 – грубый.

Оценивая ход кривых обоих рисунков, можно отметить, что зависимости изменения относительного коэффициента переноса во времени в большей степени отражают динамику переноса массы и поэтому, на наш взгляд, являются более информативными при отработке технологического процесса легирования. Так, из рис. 3 видно, что для грубого режима уже после второй минуты легирования количество перенесенного на деталь материала обрабатываемого электрода существенно падает. При этом кривая привеса (рис. 1) сохраняет линейный характер. Подобная картина, но для своих точек по времени, наблюдается на кривых и для остальных режимов. В свою очередь изменения абсолютного переноса материала обрабатываемого электрода на деталь (рис. 2) в меньшей степени отражают текущее состояние процесса переноса в связи с накопительным эффектом во времени. Причем на первом этапе занижается фактический перенос масс, а спустя определенное время (после максимумов на кривых рис. 3), эти данные завышаются, что создает иллюзию продолжения эффективного переноса массы.

Таким образом, по результатам анализа хода зависимостей рис. 3, можно ограничить удельное время легирования, которое на наш взгляд для описанных условий легирования не должно превышать 3–5 мин на квадратный сантиметр в зависимости от режима обработки.

Причина столь резкого снижения переноса эрозионной массы материала обрабатываемого электрода на деталь нами не выяснена. Как видно из рис. 1, и расход материала обрабатываемого электрода при этом остается неизменным. Можно предположить, что, в частности, для прецизионного режима невысокий коэффициент переноса может быть связан с большой амплитудой осцилляции обрабатываемого электрода, обеспечивающей уход пораженных искрой участков электродов друг от друга. Как результат, выброшенная масса материалов электродов может попасть на холодные участки их поверхностей и охладиться до порошка. Однако этот вопрос еще требует дополнительных исследований.

Следующая часть исследований касается изучения изменения шероховатости формируемых покрытий (параметра R_a) во времени. Необходимость этих исследований вытекает из следующих соображений. Известно, что по мере осуществления процесса легирования, поверхностный слой непрерывно меняет свои физико-химические свойства; состав слоя может изменяться от материала подложки до близкого к материалу обрабатываемого электрода. В связи с этим формируемая шероховатость также должна меняться в силу изменения свойств слоя, что должно проявляться в различной величине размеров эрозионных лунок по мере смены сплава слоя, а значит – в различной его шероховатости.

Результаты исследований представлены на рис. 4. Каждая точка кривых – усредненное значение как минимум десяти измерений. Для грубого и, в меньшей степени, среднего режимов, в начальный момент времени легирования характерно увеличение шероховатости с максимумом приблизительно на четвертой минуте обработки. Затем величины значений шероховатости снижаются практически до исходного на начальный момент измерений. Для прецизионного режима легирования изменение параметра R_a практически несущественно.

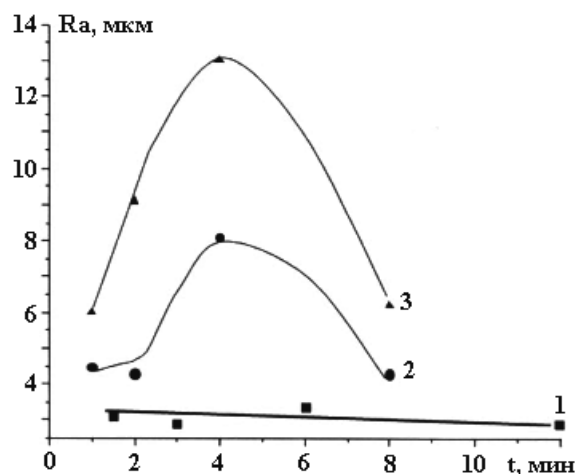


Рис. 4. Зависимость шероховатости поверхности (параметр R_a) от времени обработки при легировании в различных режимах. 1 – прецизионный; 2 – средний; 3 – грубый.

В порядке анализа полученных результатов можно сказать следующее. Увеличение шероховатости в течение обработки для грубых режимов в столь большом диапазоне значений R_a является естественным, но нежелательным технологическим фактором. Тем более, что это возрастание происходит именно, в том промежутке времени, который обычно является оптимальным для ЭИЛ.

Поскольку это нежелательное в большинстве случаев явление – характерное свойство самого способа легирования, необходим комплекс мероприятий по его устранению. Существуют различные методы снижения шероховатости. Более приемлемыми с точки зрения технологии являются методы снижения шероховатости при непосредственном проведении процесса легирования. Из них хотелось бы отметить следующие.

“Естественное” выглаживание шероховатости происходит при традиционном ЭИЛ с использованием вибраторов, осуществляющих соударение электрода и детали. Как показали наши исследования технологических возможностей установок, использующих подобного типа вибраторы, изменение шероховатости (подобно описанному выше) при легировании для каждого из режимов установки практически не проявляется во времени в связи с постоянным смятием микронеровностей соударяющимися электродами [2]. Причем изменения значений шероховатости при варьировании режимами (величиной энергии импульса) легирования от грубого (шестого) до прецизионного (третьего) также небольшое – от 5 до 3,3 мкм, соответственно. Естественно, чем выше при этом амплитуда тока питающего электромагнитную катушку вибратора, тем это смятие сильнее. Существенное влияние при этом оказывает и субъективный фактор – степень прижатия электрода оператором. Однако, как отмечалось в начале статьи, при этом данный способ контактирования электродов имеет и ряд недостатков, в частности, снижение производительности по мере перехода при обработке на мягкие и прецизионные режимы легирования.

Одним из возможных вариантов является одновременный, совмещенный процесс электроискрового нанесения и электроискрового выглаживания. Это достигается последовательной подачей импульсов тока, первый из которых обеспечивает нанесение покрытия, а последующий – выглаживание [5].

В заключение хотелось бы отметить следующее. Приведенные экспериментальные данные подтвердили возможность увеличения производительности, в том числе и при осуществлении легирования с малыми величинами электрической энергии импульсов, при использовании разновидности способа ЭИЛ со скользящим по поверхности детали обрабатывающим электродом. Перспективы этого увеличения пока полностью не раскрыты в связи с необходимостью подготовки специального оборудования. Помимо повышения производительности, эта разновидность способа ЭИЛ дает широ-

кую возможность изменять свойства обрабатываемых поверхностей путем варьирования электрическими параметрами импульсов.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Лазаренко Н.И.* Электроискровое легирование металлических поверхностей. М., Машиностроение, 1976.
2. *Rybalko A.V., Hamurari V.I., Grichuk D.M.* Perspectives of the productivity increase in electro-spark coating // *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 1999. № 1. P. 10–13.
3. *Рыбалко А.В., Гричук Д.М., Сомаараджа К.Р.С., Сахин Орхан.* Некоторые особенности осуществления процесса электроискрового легирования на установках типа ЭЛИТРОН // *Электронная обработка материалов*. 2000. № 5. С. 133–139.
4. Pat. № 1414. Moldova. 2000. Procedeu de aplicare a acoperirilor prin electrodare. Rabalco Alexandru, Gricuc Dumitru, Ermilov Vladimir, Orhan Sahin.
5. Pat. № 1053. Moldova. 1998. Procedeu de aliere prin electrorodare. Rabalco Alexandru, Gricuc Dumitru, Ermilov Vladimir, Mandru Dumitru.

Поступила 11.08.2000

Summary

The article reflects possibility of a heightening of productivity and improvement of quality of process ESA at usage of impulses with energy less than 0,5 J. In a bottom of the offered solution – waiving of conventional philosophy of forming of the spark channel encounter by a treating electrode and detail. The tendered electrode system ensures an opportunity of feeding of impulse at any moment of time, allows to implement requirements of forming of the spark channel by explosion of contacting asperities of adjoining electrodes were in continuous driving from each other (slide of a electrode on a detail) in one plane. The enumerated results of study productivity, roughness of formed coverages.

Е.К. Севидова, Л.И. Пупань, Ю.Я. Волков*, В.Е. Стрельницкий*, А.И. Тимошенко*

ВЛИЯНИЕ МЕТОДОВ НАНЕСЕНИЯ АЛМАЗОПОДОБНЫХ УГЛЕРОДНЫХ ПОКРЫТИЙ НА ИХ КОРРОЗИОННО-ЗАЩИТНЫЕ СВОЙСТВА В ФИЗИОЛОГИЧЕСКОМ РАСТВОРЕ

*Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»,
ул. Фрунзе, 21, г. Харьков, 61002, Украина*

**Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»,
ул. Академическая, 1, г. Харьков, 61108, Украина*

Введение

Алмазоподобные углеродные покрытия (АУП) наряду с уникальными физико-механическими свойствами отличаются высоким показателем биоинертности, что делает их привлекательными для применения на изделиях-имплантатах [1, 2]. Достоинства алмазоподобных углеродных покрытий как перспективного биосовместимого материала могут быть использованы в медицине только при наличии у них комплекса удовлетворительных эксплуатационных характеристик – высокой износостойкости, адгезии и коррозионной стойкости, а точнее – коррозионно-защитной способности. Последнее требование предполагает не только абсолютную коррозионную или химическую стойкость собственно субстрата пленки, но и минимальную ее пористость, сводящую к минимуму агрессивное воздействие жидкой физиологической среды на металлический материал основы имплантата – нержавеющие стали, титан и его сплавы и др. При выборе метода формирования АУП и оптимизации условий осаждения покрытия коррозионно-защитный эффект является одним из наиболее важных критериев.

© Севидова Е.К., Пупань Л.И., Волков Ю.Я., Стрельницкий В.Е., Тимошенко А.И., Электронная обработка материалов, 2001, № 2, С. 21–25.

В настоящей работе проведено сравнительное изучение защитной способности АУП, полученных разложением газообразных углеводородов в тлеющем ВЧ-разряде (АУП₁) и электродуговым методом (АУП₂).

Методика исследования

В качестве подложек использовали материалы, которые традиционно применяются в ортопедической хирургии – нержавеющей сталь 12Х18Н10Т и титановый сплав ОТ4-1.

Покрывают электродуговым методом наносили на установке оригинальной конструкции с импульсным источником, преимущества которого приведены в работе [1]. Толщина покрытий составляла ~2,5–2,7 мкм, которая была выбрана как оптимальная на этапе ранее проведенных исследований. При этой толщине формируются пленки АУП с минимальной дефектностью (пористостью) без нарушения целостности слоев из-за внутренних напряжений сжатия.

Осаждение алмазоподобных покрытий из газовой фазы производили в атмосфере ацетилена в тлеющем ВЧ-разряде при давлении 0,13 Па. Толщина гидрогенизированных АУП составляла ~ 3 мкм.

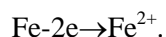
Оценку коррозионно-защитного эффекта алмазоподобных покрытий проводили с помощью электрохимического метода. В качестве критериев использовали значения потенциалов коррозии, $E_{кор}$, питтингообразования, $E_{но}$, характеристики анодных поляризационных кривых $i-E$, снятых в физиологическом растворе (0,9% растворе NaCl) при температуре $(37 \pm 2)^\circ\text{C}$. Исследования в стационарных условиях проводили с помощью стандартных методик на импульсном потенциостате ПИ-50-1.1. Для имитации условий трения в отдельных случаях эксплуатации имплантатов была использована оригинальная установка [3], позволяющая исследовать электрохимические характеристики при механической депассивации (зачистке) поверхности.

Обсуждение результатов

Из двух типов исследуемых материалов подложек более ненадежной является нержавеющая сталь 12Х18Н10Т – аналог стали 316L, широко используемой в практике ортопедической хирургии.

Чаще всего причиной поломки ортопедических изделий, которые эксплуатируются внутри организма, становится локальная (питтинговая) коррозия таких сталей [4]. Титановые сплавы практически не подвержены этому типу коррозионного разрушения. Склонность к процессу питтингообразования достаточно корректно оценивается электрохимической величиной $\Delta E_{но} = E_{но} - E_{кор}$.

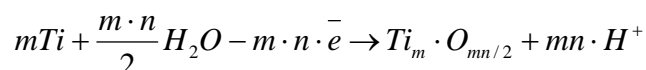
Идентичный характер анодных кривых на исходной нержавеющей стали и стали с покрытием АУП, полученным обоими методами (рис. 1), свидетельствует о наличии сквозных пор в защитных слоях при исследуемых толщинах. Скачкообразный подъем тока на $i-E$ зависимостях, соответствует реакции питтингообразования, происходящей на материале подложки с образованием растворимых соединений железа.



По отношению к исходному материалу оба типа покрытий оказывают защитный эффект – сдвигают значения $E_{но}$ в область положительных значений и увеличивают показатель $\Delta E_{но}$. Однако при почти сопоставимой толщине защитная способность покрытий АУП, полученных электродуговым методом, несколько выше, что свидетельствует о меньшем количестве в них единичных сквозных пор. Полученный результат коррелирует со значениями плотности покрытий – для первых она выше – 3,0–3,2 г/см³ и 2,0–2,4 г/см³, соответственно.

Повысить эффективность защиты за счет уменьшения сквозной пористости можно путем нанесения промежуточных слоев, например, нитрида титана, толщиной 3–5 мкм (рис. 1, кривая 4). Характерный для нержавеющей стали питтинговый пробой в рамках исследуемых потенциалов в этом случае не наблюдался. Ограничивающим фактором для использования такой системы защитных слоев могут быть внутренние напряжения в них и, как следствие, ухудшение адгезионной прочности.

Наличие пор в алмазоподобных покрытиях, в том числе и сквозных, подтверждают анодные кривые конструкций в АУП на основе из титанового сплава (рис. 2). По характеру $i-E$ зависимостей видно, что при анодной поляризации до потенциала выделения кислорода происходит электрохимическое окисление титана и карбидов титана, образующихся на поверхности сплава при нанесении углеродных слоев:



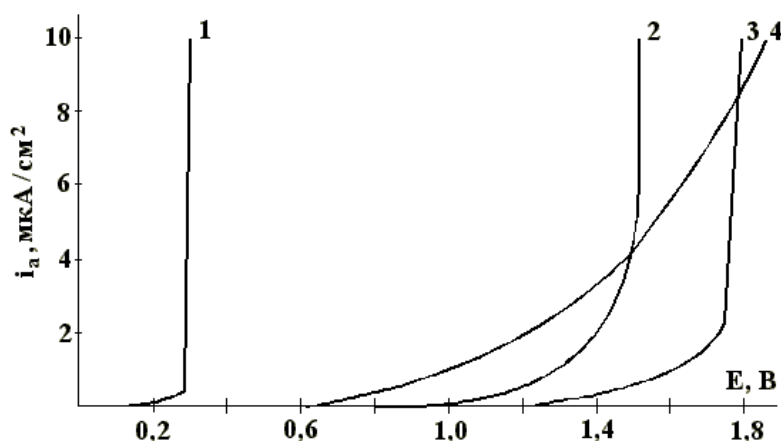
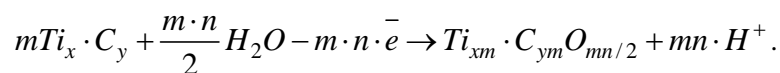


Рис. 1. Анодные поляризационные кривые конструкций на основе стали: 1 – 12X18H10T; 2 – 12X18H10T + АУП₁; 3 – 12X18H10T + АУП₂; 4 – 12X18H10T + TiN + АУП₁.

Оксиды и карбооксиды титана (продукты окисления) пассивируют поверхность, что подтверждают i – E зависимости при повторной поляризации (рис. 2, кривые 1'–3'). Как и на подложках с нержавеющей сталью большую защитную способность проявляют АУП, сформированные электродуговым способом (кривые 3, 3').

В принципе наличие единичных дефектов АУП в виде пор не представляет большой опасности для подложек на титановой основе. Чистый титан, как и его сплавы, склонен к процессу самопассивации в физиологической среде, что и гарантирует его высокую коррозионную стойкость в человеческом организме. Анодная поляризация в наших исследованиях ускоряет процесс формирования инертных оксидных пленок, что, кстати, может использоваться как технологический прием при изготовлении биоинертных покрытий на изделиях – имплантатах.

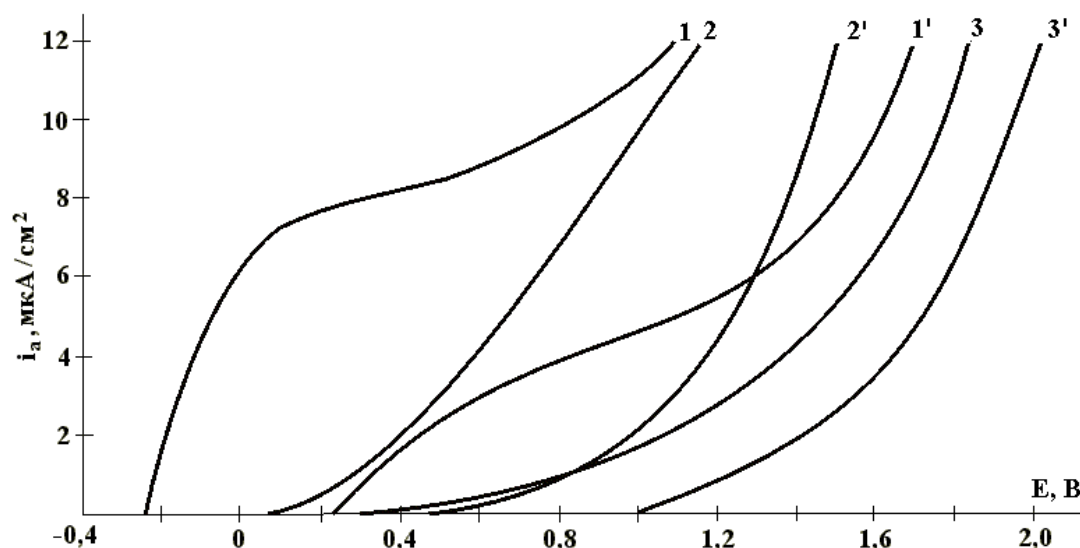


Рис. 2. Анодные поляризационные кривые конструкций на основе титанового сплава: 1,1' – OT4-1; 2,2' – OT4-1 + АУП₁; 3,3' – OT4-1 + АУП₂; 1,2,3 – первичная поляризация; 1',2',3' – повторная поляризация.

Коррозионная стойкость титановых сплавов, как и других благородных металлов и сплавов, химическая инертность которых обеспечивается наличием окисных пленок, уменьшается при нарушении целостности этих защитных слоев. Поэтому изделия имплантаты из данных материалов

разрушаются чаще всего по причине химико-механической коррозии, то есть коррозии при одновременном механическом воздействии – знакопеременной нагрузке или трении поверхности.

Механическая депассивация поверхности, имитирующая условия трения, приводит к резкому разблагораживанию (сдвигу в область отрицательных значений) потенциалов коррозии исходных материалов (рис. 3, кривые 1 и 2)), что свидетельствует о повышении коррозионной активности. Возникновение существенной разности потенциалов на двух участках одного металлического изделия чревато (опасно) еще в одном аспекте – возникновением короткозамкнутой гальванической пары. В свою очередь, гальванопара может спровоцировать протекание в организме необратимых биоэлектрохимических процессов, вызывающих патологические изменения.

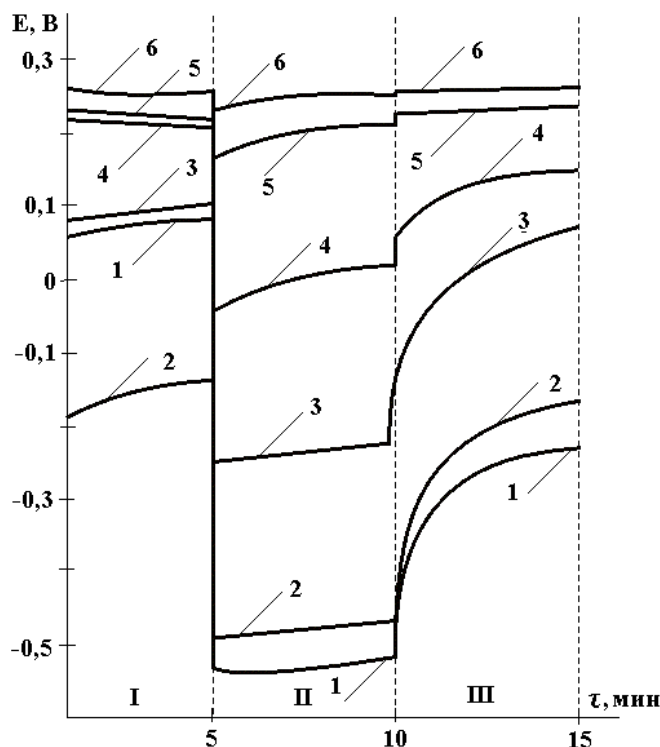


Рис. 3. Влияние механической депассивации поверхности на значения $E_{кор}$ различных конструкций: 1 – 12Х18Н10Т; 2 – ОТ4-1; 3 – 12Х18Н10Т + TiN; 4 – 12Х18Н10Т + АУП₁; 5 – 12Х18Н10Т + АУП₂; 6 – графит. I – стационарные состояния, II – момент депассивации; III – после снятия депассивации.

Нанесение защитных покрытий, в том числе, нитрида титана (кривая 3), уменьшает разность потенциалов коррозии между запассивированной и активированной поверхностью, что является положительным эффектом. По отношению к нитридным покрытиям оба типа АУП имеют преимущества – разность $\Delta E_{кор}$ у них меньше. Это отличие объясняется наличием фазовой окисной пленки на поверхности металлоподобного TiN, которая придает конструкции с покрытием дополнительную инертность. В случае АУП инертность внешней поверхности обеспечивается термодинамической устойчивостью углеродной субстанции, независимо от аллотропических форм его существования – графита, алмаза, карбина и т.д. Это подтверждает $E-t$ зависимость, полученная на образце с АУП, сформированным электродуговым методом (рис.3, кривая 5). Она идентична аналогичной зависимости, полученной на чистом графите (рис. 3, кривая 6). Небольшие различия в значениях потенциалов коррозии между двумя образцами связаны с влиянием материала основы в порах покрытия.

Наличие водорода в АУП сформированных из газовой фазы, вероятно, способствует образованию, если не фазовых, то хемосорбированных кислородосодержащих слоев (например, OH^-), удаление которых приводит к разблагораживанию значения $E_{кор}$. По сравнению с электродуговыми покрытиями $\Delta E_{кор}$ для конструкций с таким видом АУП на 100-120 мВ больше ($\Delta E_{кор} = E_{кор} - E_{кор}^*$, где $E_{кор}^*$ – значения потенциалов коррозии в момент депассивации поверхности).

Заключение

На основе проведенных электрохимических исследований можно утверждать, что при сопоставимых толщинах, порядка 2,5-3 мкм, алмазоподобные углеродные покрытия, сформированные

электродуговым способом, оказывают относительно больший защитный эффект от коррозии в физиологической среде, чем гидрогенизированные алмазоподобные пленки, полученные из тлеющего ВЧ-разряда. Лучшие защитные свойства обеспечиваются меньшим количеством сквозных пор и химической однородностью внешних слоев АУП, не содержащих посторонних элементов, в частности, водорода. Оба типа покрытий эффективно защищают металлические основы имплантатов от абразивного износа и уменьшают вероятность возникновения короткозамкнутых гальванических элементов, которые могут вызвать появление необратимых биоэлектрохимических процессов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Sevidova E.K., Strel'nitsky V.E., Volkov Yu. Ya., Pupan L.I. Effect of diamond-like carbon coatings on electrochemical behaviour of metal biomedical materials. Proc. 4th International Symposium on Diamond Films and Related Materials. Kharkov, Ukraine, 20–22 September, 1999, pp. 319–322.
2. Olborska A., Swider M., Wolowiec R., Niedzielski P., Rylski A., Mitura S. Amorphous carbon-biomaterial for implant coatings //Diamond and Related Materials, 1994. № 3. P. 899–901.
3. Котляр А.М., Севидова Е.К., Стеглик Т.В. Измерение токов коррозионных элементов при их механической депассивации //Физико-химическая механика материалов. 1991. №1. С. 103–105.
4. Личковський Е.Ю. Особливості корозії імплантатів в біологічних тканинах //Матер. IV міжнар. конф.-виставки: Проблеми корозії та протикорозійного захисту конструкційних матеріалів. 1998. Львів. С. 111–112.

Поступила 29.11.2000

Summary

Comparative estimation of corrosion resistance of structural materials for medical implants coated with a diamond-like carbon (DLC) layer in physiological solution was made. It was established, that within the comparable thickness range (2,5–3 μm) DLC coatings produced by the electric-arc methods differ from the a-C:H coatings produced by RF-glow discharge method by relatively greater protective effect under stationary conditions and under conditions of mechanical depassivation imitated the friction process at endoprosthesis articulations.

С.О. Ширяева, Д.Ф. Белоножко, А.И. Григорьев, А.С. Голованов

НЕЛИНЕЙНЫЕ КАПИЛЛЯРНЫЕ КОЛЕБАНИЯ ЗАРЯЖЕННОЙ КАПЛИ

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

Исследования динамики колебаний поверхности капель жидкости вызывают постоянный интерес на протяжении многих лет, поскольку капля является ключевым объектом в самых разнообразных геофизических, технических и технологических явлениях и процессах. Например, с ней приходится встречаться в распылителях жидких топлив и в устройствах каплеструйной печати [1], при исследовании проблем грозового электричества [2] и в капельной модели ядра атома [3–5].

Впервые теоретическое изучение капиллярных колебаний и линейная теория устойчивости заряженной сферической капли были представлены Рэлеем [6] (см. также [7]). Он рассмотрел каплю как колебательную систему с бесконечным набором собственных частот колебаний. В качестве отдельных мод осесимметричных колебаний поверхности рассматривались колебания, описываемые соответствующими полиномами Лежандра, при этом номер моды соответствовал числу выпуклостей (или впадин) на поверхности капли. Рэлей рассчитал частоты капиллярных колебаний и нашел критические условия потери устойчивости различными осесимметричными модами сильно заряженной капли. Наименее устойчивой оказалась основная (вторая) мода капиллярных колебаний, критические условия потери устойчивости которой и определяют устойчивость всей капли. Величину заряда на капле фиксированного радиуса с заданным коэффициентом поверхностного натяжения, при которой теряет устойчивость основная мода, принято называть рэлеевским пределом устойчивости Q_c заряженной капли. При превышении зарядом рэлеевского предела капля неустойчива и у нее не существует равновесных сферических форм.

В последние два десятилетия появился ряд работ, посвященных изучению нелинейной динамики поверхности капли [8–16, 17, 18]. Можно выделить три направления проводимых исследований: 1) нелинейный анализ эволюции капиллярных осцилляций поверхности капли с применением классических методов теории возмущений; 2) расчет статических форм капли вблизи рэлеевского предела и анализ характера бифуркаций решений, имеющих место в окрестности критического значения заряда; 3) исследование взаимодействия между отдельными модами колебаний заряженной капли.

Впервые классические методы теории возмущений (метод Линштедта-Пуанкаре) к исследованию осесимметричных капиллярных колебаний конечной амплитуды, совершаемых поверхностью незаряженной капли несжимаемой вязкой жидкости, были применены в [8]. Это позволило получить поправки к форме поверхности капли, потенциалам скоростей и частотам колебаний во втором порядке малости по амплитуде начального возмущения равновесной формы капли, вызванного виртуальным увеличением амплитуды n -ой моды для $n = 2, 3, 4$. В экспериментальных исследованиях сдвига частоты при нелинейных колебаниях капли в условиях отсутствия силы тяжести, проведенных в [9], получено хорошее согласие с данными работы [8]. В работе [10] на основе более подходящего для исследования многочастотных колебаний метода многих масштабов были исследованы осцилляции конечной амплитуды заряженной капли идеальной несжимаемой жидкости, вызванные начальным возбуждением первых трех мод ($n = 2, 3, 4$), для случая заряда, меньшего рэлеевского предела. Однако выяснилось, что при приближении величины заряда к критическому значению найденные в [10] поправки к амплитудам гармонических колебаний становятся несправедливыми, так как содержат неограниченно нарастающие при $Q \rightarrow Q_c$ слагаемые. Для устранения таких расходи-

мостей в [11] на основе асимптотического поведения решений, полученных в [10], малый параметр масштабирования ε вводится таким образом, чтобы он характеризовал соотношение между амплитудой деформации и отклонением величины заряда на капле Q от критического Q_c . Это позволило авторам [11] проанализировать нелинейную динамику осесимметричных осцилляций поверхности невязкой заряженной капли вблизи рэлеевского предела и получить с точностью до второго порядка малости по величине ε решения, описывающие эволюцию формы капли, поля скоростей и электрического поля при начальном возбуждении основной моды колебаний поверхности. Нелинейный анализ неосесимметричных колебаний капли, несущей заряд, мало отличающийся от рэлеевского предела, методами, использованными в [11], предпринят в [13], где получены динамические уравнения для амплитуд неосесимметричных мод, описываемых сферическими функциями второго порядка. Решения этих уравнений в зависимости от величины начальной деформации и близости заряда к критическому значению могут проявлять стохастическое поведение.

Нелинейная структура и устойчивость осесимметричных статических форм поверхности идеально проводящей заряженной невязкой капли с зарядом вблизи Рэлеевского предела при начальном возбуждении основной ($n=2$) моды рассматривались в [11]. В частности было показано, что рэлеевский предел соответствует точке транскритической бифуркации семейства статических сферических форм капли на семейства осесимметричных вытянутых и сплюснутых сфероидальных форм (этот результат был подтвержден численными расчетами [12]). Вытянутые формы существуют при значениях заряда, меньших критического, и неустойчивы по отношению к малоамплитудным возмущениям поверхности. Сплюснутые статические формы существуют при зарядах, больших рэлеевского предела, причем они оказались устойчивыми по отношению к малым осесимметричным возмущениям. Кроме того выяснилось, что при значениях заряда, немного меньших критического, устойчивость исходной сферической формы капли может быть нарушена колебаниями конечной амплитуды. Причем величина заряда, на которую снижается его критическое значение, пропорциональна амплитуде начального удлинения капли. Результаты аналитических вычислений в [11] подтверждаются численными расчетами статических форм поверхности капли при возбуждении первых трех мод. Численный анализ осесимметричных статических форм заряженной капли вблизи рэлеевского предела был продолжен в [16] с использованием интегральной формы уравнения Лапласа. В квадратичном по амплитудам мод приближении обнаружены несимметричные относительно экваториальной плоскости формы капель, неустойчивые в линейном приближении. В работе [13] при анализе неосесимметричных колебаний капли получено, что сплюснутые сфероидальные формы капли, существующие согласно [11] и численным расчетам [12] при $Q \geq Q_c$, неустойчивы по отношению к неосесимметричным возмущениям (позднее аналогичный результат получен и в линейном анализе [14, 15]) рэлеевский предел соответствует точке абсолютной неустойчивости заряженной капли. Начальная стадия реализации неустойчивости заряженной капли проходит через последовательность удлиняющихся вытянутых сфероидов.

Вопросы взаимодействия различных мод капиллярных колебаний заряженной поверхности капли рассматривались в работах [10, 17]. Основное внимание в [10] было уделено анализу "вторичного" резонансного взаимодействия двух высоких мод, которое проявляется в нарастании поправок второго порядка малости к амплитудам колебаний, когда частоты соответствующих мод удовлетворяют соотношению $\omega_m^2 = k^2 \omega_n^2$ (где k – целое, $m \neq n$). Для частного случая $m=6$, $n=4$ получены выражения для частот и амплитуд модулированного колебания при различных начальных условиях. Исследование взаимодействия различных мод капиллярных колебаний заряженной капли было продолжено в [17], где показано, что неустойчивость капли, заряженной немного меньше рэлеевского предела, может наступать вследствие нелинейного взаимодействия нерезонансных мод (то есть когда частоты взаимодействующих мод не связаны никаким явным соотношением). В случае, когда начальное возмущение представляет собой возбуждение одной из высоких мод капиллярных колебаний, но амплитуда этой моды недостаточно велика, чтобы реализовалась ее неустойчивость, может претерпеть неустойчивость основная мода за счет нелинейного взаимодействия с устойчивой возбужденной модой.

Все аналитические исследования [8, 10, 11, 13, 16, 17] нелинейной динамики поверхности капли проводились в рамках модели идеальной жидкости. Лишь в работе [18] при расчетах численными методами было учтено влияние вязкости жидкости на осцилляции формы капли. Получено, что даже наличие малой вязкости существенным образом сказывается на резонансом взаимодействия отдельных мод колебаний.

В настоящей работе в более общей, чем в [3] постановке решается методом многих масштабов задача о расчете спектра капиллярных колебаний и взаимодействия различных мод во втором порядке малости по амплитуде начального возмущения капли вязкой проводящей жидкости, заряженной ниже Рэлеевского предела. Использование иной по сравнению с [10] методики удовлетворения начальным условиям позволило получить решение для ситуаций, когда начальное возмущение поверхности связано с начальным возбуждением двух произвольных мод колебаний.

2. Рассмотрим эволюцию во времени формы поверхности капли идеальной, несжимаемой, идеально проводящей жидкости с плотностью ρ , коэффициентом поверхностного натяжения σ . Примем, что капля находится в вакууме, ее полный заряд равен Q , а объем определяется объемом сферы с радиусом R . Пусть в начальный момент времени $t=0$ равновесная сферическая форма капли претерпела виртуальное осесимметричное возмущение фиксированной амплитуды, существенно меньшей радиуса капли. Зададимся целью определить спектр возникающих в такой ситуации капиллярных осцилляций капли (форму капли) в последующие моменты времени $t>0$. В нижеследующих рассуждениях будем пользоваться безразмерными переменными, в которых $R=\rho=\sigma=1$.

Поскольку начальное возмущение поверхности капли осесимметрично и мало, введем следующие упрощения: 1) форму поверхности капли будем принимать осесимметричной как в начальный момент, так и во все последующие моменты времени, а уравнение, описывающее поверхность капли, в полярной системе координат с началом в центре капли представим в виде

$$r(\theta, t) = 1 + \xi(\theta, t), \quad |\xi| \ll 1; \quad (1)$$

движение жидкости в капле будем полагать потенциальным, то есть примем, что поле скоростей движения жидкости в капле $\vec{V}(\vec{r}; t) = \nabla \psi(\vec{r}; t)$ полностью определяется функцией потенциала скорости $\psi(\vec{r}; t)$:

$$\Delta \psi(\vec{r}; t) = 0; \quad (2)$$

$$\Delta \Phi(\vec{r}; t) = 0; \quad (3)$$

и граничных условий:

$$r \rightarrow 0: \quad \psi(\vec{r}; t) \rightarrow 0; \quad (4)$$

$$r \rightarrow \infty: \quad \Phi(\vec{r}; t) \rightarrow 0; \quad (5)$$

$$r = 1 + \xi(\theta, t): \quad \frac{\partial \xi}{\partial t} = \frac{\partial \psi}{\partial r} - \frac{1}{r^2} \frac{\partial \xi}{\partial \theta} \frac{\partial \psi}{\partial \theta}; \quad (6)$$

$$\Delta p - \frac{\partial \psi}{\partial t} - \frac{1}{2} (\nabla \psi)^2 + \frac{1}{8\pi} (\nabla \Phi)^2 = \nabla \cdot \vec{n}; \quad (7)$$

$$\Phi = const. \quad (8)$$

Чтобы замкнуть систему (2)–(8), сформулируем дополнительные условия. Неизменности полного заряда капли:

$$-\frac{1}{4\pi} \oint_S (\vec{n} \cdot \nabla \Phi) ds = Q, \quad \text{где } S = \begin{cases} r = 1 + \xi(\theta, t); \\ 0 \leq \theta \leq \pi; \\ 0 \leq \phi \leq 2\pi; \end{cases} \quad (9)$$

неизменности объема капли:

$$\int_V r^2 dr \cdot \sin \theta \cdot d\theta \cdot d\phi = \frac{4}{3} \pi, \quad \text{где } V = \begin{cases} 0 \leq r \leq 1 + \xi(\theta, t); \\ 0 \leq \theta \leq \pi; \\ 0 \leq \phi \leq 2\pi. \end{cases} \quad (10)$$

Начальные условия к поставленной задаче сформируем в виде задания начальной деформации равновесной сферической формы капли

$$t=0: \quad \xi(\theta) = \xi_0 + \varepsilon \cdot \sum_{i \in R} h_i P_i(\cos \theta); \quad \sum_{i \in R} h_i = 1; \quad (11)$$

и равенства нулю начальной скорости движения поверхности

$$t=0: \quad \frac{\partial \xi(\theta)}{\partial t} = 0. \quad (12)$$

В (11) k – множество значений номеров возбужденных мод.

В выписанных соотношениях используются следующие обозначения: Δp – перепад постоянных давлений внутри и вне капли в состоянии равновесия; ε – амплитуда начального возмущения формы поверхности капли; $P_j(\cos \theta)$ – полиномы Лежандра порядка j ; ξ_0 – константа, определяемая из условия (10) и с точностью до слагаемого второго порядка малости равная

$$\xi_0 \approx -\varepsilon^2 \sum_{i \in R} \frac{h_i^2}{(2i+1)} + 0(\varepsilon^3). \quad (13)$$

3. Для отыскания решения поставленной задачи с точностью до квадратичных по малому параметру ε слагаемых воспользуемся классическим методом многих масштабов [19]. А сами искомые функции $\xi(\theta, t)$, $\psi(\vec{r}, t)$, $\Phi(\vec{r}, t)$ представим в виде рядов по степеням малого параметра ε и будем считать зависящими не просто от времени t , а от разных его масштабов, определенных через малый параметр ε : $T_m \equiv \varepsilon^m t$:

$$\begin{aligned} \xi(\theta, t) &= \sum_{m=0} \varepsilon^m \xi^{(m)}(\theta, T_0, T_1, T_2, \dots); \\ \psi(\vec{r}, t) &= \sum_{m=0} \varepsilon^m \psi^{(m)}(\theta, T_0, T_1, T_2, \dots); \\ \Phi(\vec{r}, t) &= \sum_{m=0} \varepsilon^m \Phi^{(m)}(\theta, T_0, T_1, T_2, \dots). \end{aligned} \quad (14)$$

В итоге найдем выражение для изменения во времени формы поверхности капли:

$$\begin{aligned} r(\theta, t) &\approx 1 + \varepsilon \left\{ \sum_{i \in R} h_i \cos(\omega_i t) \cdot P_i(\mu) \right\} - \varepsilon^2 \left\{ \frac{1}{2} \sum_{i \in R} \frac{h_i^2}{(2i+1)} [1 + \cos(2\omega_i t)] \right\} \\ &+ \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ N_n(t=0) \cdot \cos(\omega_n t) - N_n(t) \cdot P_n(\mu) \right\} + 0(\varepsilon^3 t); \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} N_n(t) &= \frac{1}{2} \left\{ h_k^2 \cdot \left[\lambda_{k,k,n}^{(-)} + \lambda_{k,k,n}^{(+)} \cdot \cos(2\omega_k t) \right] + h_k h_p \left[\lambda_{k,p,n}^{(+)} + \lambda_{p,k,n}^{(+)} \right] \cdot \cos((\omega_k - \omega_p)t) + \right. \\ &\left. \left[\lambda_{k,p,n}^{(-)} + \lambda_{p,k,n}^{(-)} \right] \cdot \cos((\omega_k - \omega_p)t) + h_p^2 \left[\lambda_{p,p,n}^{(-)} + \lambda_{p,p,n}^{(+)} \cdot \cos(2\omega_p t) \right] \right\}. \end{aligned}$$

$$\lambda_{mnl}^{(+)} \equiv \left[\gamma_{mnl} \pm \omega_n \omega_l \eta_{mnl} \right] \cdot \left[\omega_n^2 - (\omega_m - \omega_l)^2 \right]^{-1};$$

$$\gamma_{mnl} \equiv K_{mnl} \left[\omega_m^2 \cdot (n-m+1) + 2n[l(l+1)-1] + [l(m+1) - m(2m-2n+7) + 3] \cdot n \frac{Q}{8\pi} \right] +$$

$$+ \alpha_{mnl} \left[\frac{1}{m} \omega_m^2 + n \frac{Q}{8\pi} \right]; \quad \eta_{mnl} \equiv K_{mnl} \left(\frac{n}{2} - m + 1 \right) + \alpha_{mnl} \cdot \frac{1}{m} \left(1 + \frac{n}{2l} \right);$$

$$\eta_{mnl} \equiv K_{mnl} \left(\frac{n}{2} - m + 1 \right) + \alpha_{mnl} \cdot \frac{1}{m} \left(1 + \frac{n}{2l} \right);$$

$$K_{mnl} \equiv \left[C_{mnl}^{000} \right]^2; \quad \alpha_{mnl} \equiv -\sqrt{m(m+1)l(l+1)} C_{mnl}^{000} C_{mnl}^{-110},$$

$$C_{\min}^{000} \equiv \begin{cases} 0, & \text{если } m+l+n = 2g+1, \text{ где } g - \text{целое число} \\ \frac{(-1)^{g-n} \sqrt{2n+1} g!}{(g-m)!(g-l)!(g-n)} \left[\frac{(2g-2m)!(2g-2l)(2g-2n)!}{(2g+1)!} \right]^{1/2}, & \end{cases}$$

если $m+l+n=2g$ (g – целое число);

$$C_{m\ln}^{-110} \equiv \sqrt{2n+1} n! \left[\frac{(m+1-n)!m(m+1)}{(n+m-l)!(n-m+l)!(m+l+n+1)!l(l+1)} \right]^{1/2} \times \\ \times \sum_z \frac{(-1)^{m+n+z} (m+z-1)!(n+l-z+1)}{z!(m-z+1)!(n-z)!(l-n+z-1)!}.$$

В последней сумме суммирование ведется по всем целым значениям z , для которых выражения под знаком факториала неотрицательны. Отметим, что $C_{m\ln}^{000}$ и $C_{m\ln}^{-110}$ – коэффициенты Клебша-Гордана [20], которые отличны от нуля только, если нижние индексы удовлетворяют следующим соотношениям:

$$|m-l| \leq n \leq (m+l); \quad m+l+n=2g, \quad (g - \text{целое число}).$$

Причем согласно (28) $\lambda_{k,k,n}^{(\pm)}$ и $\lambda_{p,p,n}^{(\pm)}$ отличны от нуля лишь для четных значений n , принадлежащих диапазонам $[0, \eta_k]$ и $[0, \eta_p]$ соответственно, а $\lambda_{k,p,n}^{(\pm)}$ и $\lambda_{p,k,n}^{(\pm)}$ – для значений n из диапазона $[|k-p|, (k+p)]$, удовлетворяющих условию: $n+k+p$ – четное.

Таким образом, при одновременном возбуждении четной и нечетной мод в результате их взаимодействия во втором порядке малости будет генерироваться возмущение всех четных мод из диапазона $[0; \max(2k, 2p)]$ и всех нечетных мод из диапазона $[|k-p|, (k+p)]$.

Интересно отметить, что начальное возмущение двух соседних высоких мод колебаний инициирует возбуждение моды с $n=1$, описывающей смещение капли как целого (то есть движение центра масс осциллирующей капли). Таким образом, капля оказывается трансляционно неустойчива. Этот вывод находится в согласии с результатами работы [21], посвященной исследованию трансляционной неустойчивости пузыря при колебаниях его поверхности.

4. Из (15) видно, что начальное возмущение любой k -ой (четной, либо нечетной) одиночной моды капиллярных колебаний приводит к возбуждению во втором порядке малости только четных мод с номерами, лежащими в диапазоне $[0; 2k]$, что иллюстрируется рис. 1,а,б. На рисунках приведены рассчитанные по (15) графики зависимости от времени амплитуд $M_n^{(2)}$ различных мод капиллярных осцилляций заряженной капли, возбуждающихся во втором порядке малости в результате взаимодействия. Начальное искажение равновесной сферической формы задано в виде возмущения 2-й и 5-й мод, соответственно при $W=3,9$ (критическое для начала неустойчивости сферической капли значение параметра W определено соотношением $W_*=4$). Несложно видеть, что (в противоречии с предсказаниями линейной теории) независимо от вида начального возмущения равновесной сферической формы капли, несущей заряд, близкий к критическому, но меньший его, неустойчивость по отношению к собственному заряду может быть реализована через быстрое нарастание амплитуды основной моды ($n=2$). Этот вывод качественно согласуется с данными [17], посвященной численному расчету нелинейных осцилляций заряженной капли. Когда начальная деформация связана с пятой модой, имеется и количественное согласие временных зависимостей амплитуд, возбужденных во втором порядке малости мод с работой [17].

Из рис. 1 видно, что скорость увеличения амплитуды основной моды увеличивается с ростом номера моды, определяющей начальную деформацию. С увеличением номера моды, начальное возмущение которой определяет исходное возмущение равновесной сферической формы, растет и количество мод, возбуждающихся за счет взаимодействия.

На рис. 2,а,б приведены рассчитанные по соотношениям (1), (15) контуры форм капли (ось симметрии горизонтальна) в различные моменты безразмерного времени при значениях параметра W , близких к критическому, когда начальное возмущение равновесной сферической формы задано в виде возмущения второй и пятой мод соответственно. Следует отметить, что область равномерной пригодности соотношений (15) в соответствии с представлениями теории возмущений определена условием $t < \varepsilon^{-1}$. На самом деле выписанное ограничение по времени t еще более жесткое, что видно из приведенных иллюстраций. Кривые с номером 4 построены уже на границе применимости равномерного разложения. Это следует из сравнения амплитуд результирующих отклонений поверхности капли (кривые 4) от ее формы в начальный момент времени (кривые 2) и проявляется в очевидном несохранении первоначального объема для капель с образующими, обозначенными номером 4.

Тем не менее, несложно видеть, что когда начальное возмущение равновесной формы определено четными полиномами Лежандра, то образующая форма капли в любой момент времени строится из четных же полиномов Лежандра и имеет симметричный относительно начала координат вид. При достаточно большом t (лежащем на границе интервала равномерности решения по t) капля проявляет тенденцию к делению на две равные части. Если же начальное возмущение связано с нечетными полиномами Лежандра, то форма капли в любой последующий момент времени асимметрична относительно начала координат, несмотря на то, что за счет взаимодействия мод во втором порядке малости по ε возбуждаются только четные моды. При больших t такая капля проявляет тенденцию к асимметричному делению.

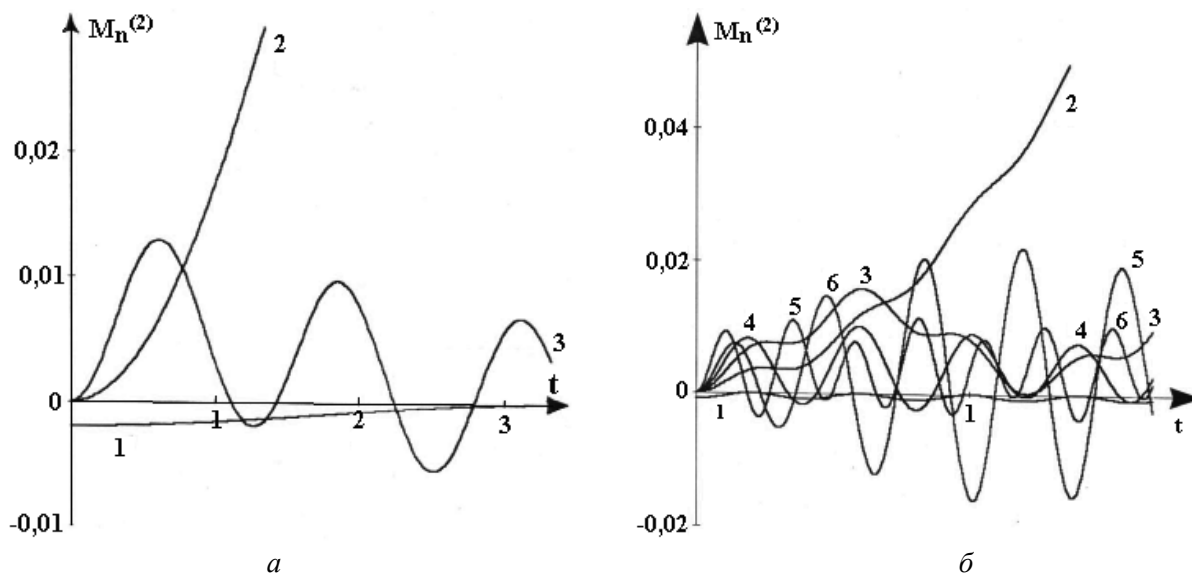


Рис. 1. Графики зависимости от безразмерного времени t безразмерных амплитуд $M_n^{(2)}$ различных мод капиллярных осцилляций заряженной капли при $W=3,9$, возбуждающихся в результате взаимодействия во втором порядке малости: 1 – нулевая мода; 2 – вторая (основная) мода; 3 – четвертая мода; 4 – шестая мода; 5 – восьмая мода; б – десятая мода. Начальное искажение равновесной сферической формы задано в виде возмущения с безразмерной амплитудой ε : рис. 1,а) второй моды; рис. 1,б) пятой моды.

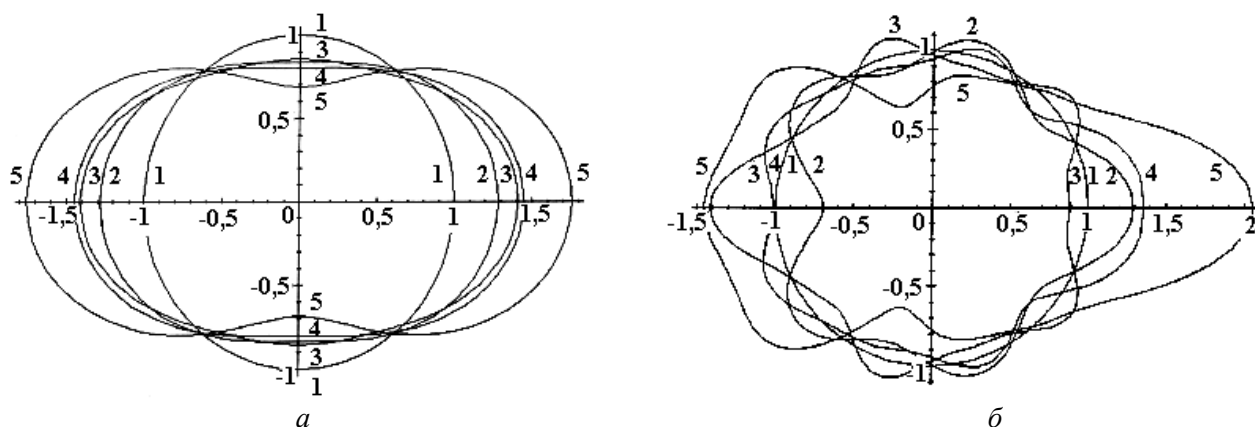


Рис. 2,а. Контуры огибающей формы капли в различные моменты времени, когда начальное возмущение с амплитудой $\varepsilon=0,3$ равновесной сферической формы задано в виде виртуального возмущения различных мод. Кривая 1 определяет равновесную сферическую форму; 2 – форму в начальный момент времени (сферическую форму, деформационную возмущением вида $\varepsilon P_n(\cos \theta)$, $n=2$; 5).
 а: $n=2$; $W=3,9$. Кривая 3 соответствует моменту времени $t=0,14 \cdot \varepsilon^{-1}$; кривая 4 – моменту времени $t=0,28 \cdot \varepsilon^{-1}$; кривая 5 – моменту времени $t=0,56 \cdot \varepsilon^{-1}$.
 б: $n=5$; $W=3,8$. Кривая 3 соответствует моменту времени $t=0,1 \cdot \varepsilon^{-1}$; кривая 4 – моменту времени $t=0,2 \cdot \varepsilon^{-1}$; кривая 5 – моменту времени $t=0,475 \cdot \varepsilon^{-1}$.

На рис. 3–5 приведены рассчитанные по (15) графики зависимости от времени амплитуд $M_n^{(2)}$ различных мод капиллярных осцилляций заряженной капли, возбуждающихся во втором порядке малости, когда начальное искажение равновесной сферической формы задано в виде одновременного возмущения двух (рис. 3, 4) и трех (рис. 5) различных мод. На рис. 4 приведены результаты расчета амплитуд в условиях внутреннего нелинейного резонанса между четвертой и шестой модами, в результате которого между ними имеет место интенсивная перекачка энергии. В условиях резонанса амплитуда резонансной четвертой моды превышает амплитуду основной моды. Взаимодействие резонансного типа возникает между модами во втором порядке малости, частоты колебаний которых при некотором значении заряда Q удовлетворяют соотношению $\omega_m^2 = j^2 \cdot \omega_n^2$, где j – целое число, а $m \neq n$. В результате такого взаимодействия амплитуды соответствующих мод неограниченно (в использованном приближении) периодически нарастают во времени. На рис. 6, 7 приведены рассчитанные для ситуаций с многомодовым начальным возмущением контуры форм капли в различные моменты безразмерного времени.

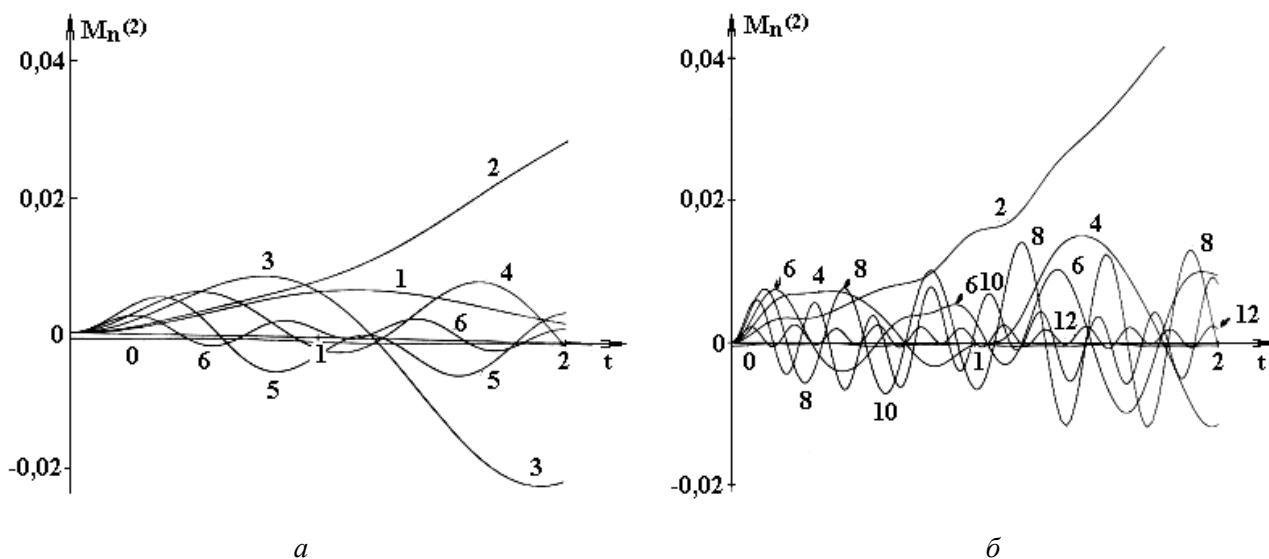


Рис. 3. Графики зависимости от безразмерного времени t безразмерных амплитуд $M_n^{(2)}$ различных мод капиллярных осцилляций заряженной капли, возбуждающихся в результате взаимодействия во втором порядке малости при $W=3,9$, $\varepsilon=0,1$, если начальная деформация задана в виде: а) $\varepsilon \cdot [P_2(\mu) + P_3(\mu)]/2$; б) $\varepsilon \cdot [P_4(\mu) + P_6(\mu)]/2$. Цифра у кривой совпадает с номером моды.

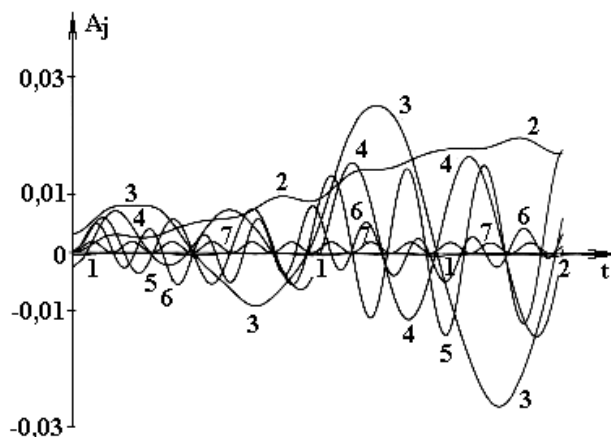


Рис. 4. Временные зависимости амплитуд мод, возбуждаемых во втором порядке малости при $\varepsilon=0,1$, в окрестности резонанса (когда $\omega_6^2 = 4 \cdot \omega_4^2$). Кривая 1 соответствует нулевой моде; 2 – второй моде; 3 – четвертой моде; 4 – шестой моде; 5 – восьмой моде; 6 – десятой моде; 7 – двенадцатой моде. Начальная деформация задана в виде виртуального возмущения: $\varepsilon \cdot [P_4(\mu) + P_6(\mu)]/2$.

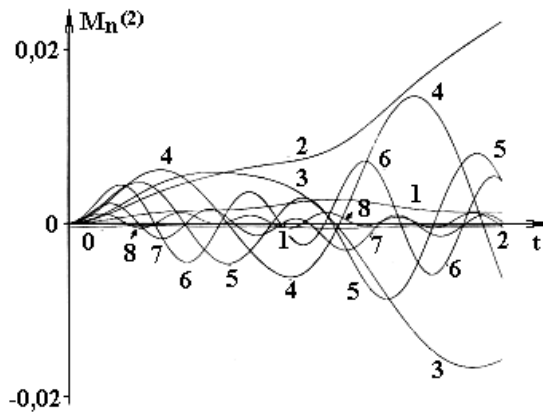


Рис. 5. Графики зависимости от безразмерного времени t безразмерных амплитуд $M_n^{(2)}$ различных мод капиллярных осцилляций заряженной капли, возбуждающихся в результате взаимодействия во втором порядке малости при $W=3,9$, $\varepsilon=0,1$, если начальная деформация задана в виде суперпозиции трех мод: $\varepsilon \cdot [P_2(\mu) + P_3(\mu) + P_4(\mu)] / 3$. Цифра у кривой совпадает с номером моды.

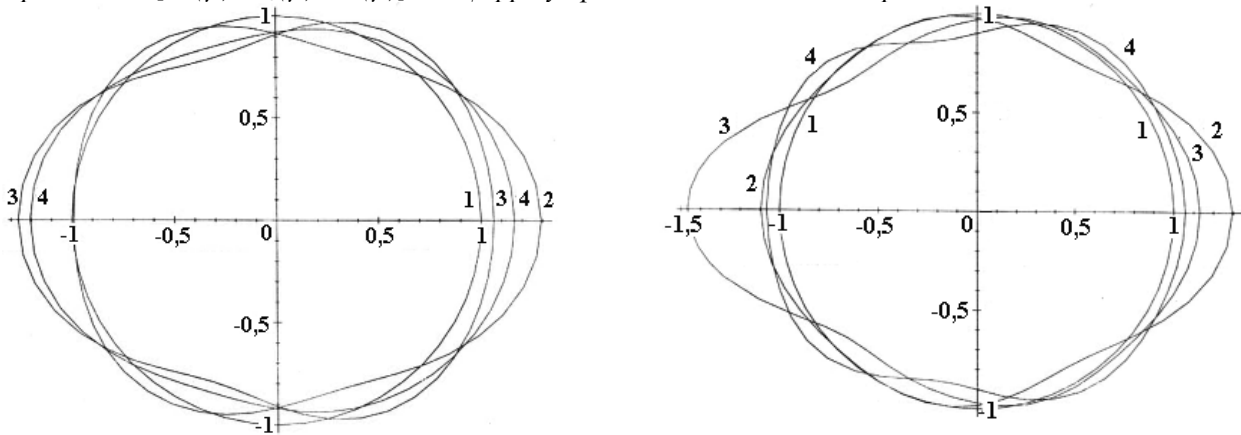


Рис. 6. Контуры образующей формы капли при $W=3,6$ в различные моменты времени, когда начальное возмущение с амплитудой $\varepsilon=0,3$ равновесной сферической формы задано в виде виртуального возмущения различных мод. Кривая 1 определяет равновесную сферическую форму; кривая 2 – форму в начальный момент времени: а) начальная деформация имеет вид $\varepsilon \cdot [0,5 \cdot P_2(\mu) + 0,5 \cdot P_3(\mu)]$; кривая 3 определяет форму капли в момент времени $t=0,35 \cdot \varepsilon^{-1}$; кривая 4 – в момент времени $t=0,525 \cdot \varepsilon^{-1}$; б) начальная деформация имеет вид $\varepsilon \cdot \left[\frac{1}{3} P_2(\mu) + \frac{1}{3} P_3(\mu) + \frac{1}{3} P_4(\mu) \right]$; кривая 3 определяет форму капли в момент времени $t=0,385 \cdot \varepsilon^{-1}$; кривая 4 – в момент времени $t=0,525 \cdot \varepsilon^{-1}$.

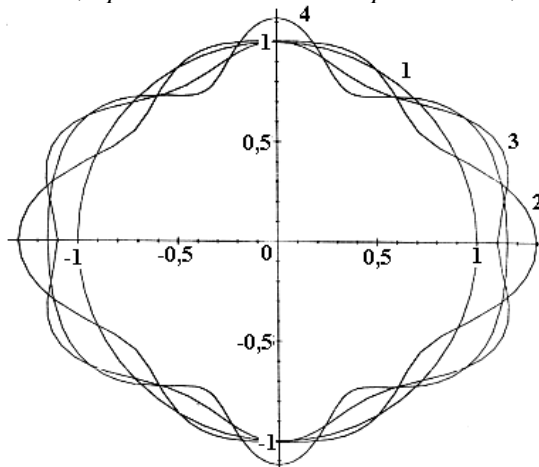


Рис. 7. Контуры образующей формы заряженной капли при $\varepsilon=0,3$ в момент времени $t=0,4 \cdot \varepsilon^{-1}$ в условиях нелинейного резонанса четвертой и шестой мод при $W=W_p=2,67$ (кривая 3) и вдали от него при $W=1,2 \cdot W_p$ (кривая 4), когда начальная деформация имеет вид $\varepsilon \cdot [P_4(\mu) + P_6(\mu)] / 2$. Кривые 1 и 2 соответствуют равновесной сферической форме и форме капли в начальный момент времени.

5. Из приведенных графиков следует, что в отсутствие внутренних резонансов независимо от вида начальной деформации наиболее быстро растет амплитуда основной моды капиллярных колебаний. Поскольку использованная процедура расчета обеспечивает пригодность полученных выражений до тех пор пока амплитуда мод, возбужденных во втором порядке малости, не сравняется с амплитудой начального возмущения, то увеличение амплитуды основной моды до величины порядка ε будет соответствовать вытягиванию капли в сфероид с квадратом эксцентриситета $e^2 \approx 3\varepsilon - 5,25 \cdot \varepsilon^2$ [22]. Несложно видеть, что даже при малых значениях $\varepsilon \sim 0,1$ это приведет к заметному удлинению капли и к снижению, согласно [23], критических условий реализации неустойчивости капли по отношению к собственному заряду.

ЛИТЕРАТУРА

1. Williams A. Combustion of droplets of fluid fuels // *Combust. Flame*. 1973. V.21. P. 1–31.
2. Григорьев А.И., Ширяева С.О. Капиллярные неустойчивости заряженной поверхности капель и электродиспергирование жидкостей // *Изв. РАН. МЖГ*. 1994. № 3. С. 3–22.
3. Cohen S., Swiatecki W.J. The deformation energy of a charged drop. Part 4 // *Ann. of Phys.* 1962. V.19. P. 67–164.
4. Cohen S., Swiatecki W.J. The deformation energy of a charged drop. Part 5 // *Ann. of Phys.* 1963. V. 22. P. 406–437.
5. Nix J.R. Calculation of fission barriers for heavy and superheavy nuclei // *Ann. Rev. Nucl. Sci.* 1972. V. 22. P. 65–120.
6. Rayleigh J.W.S. On the equilibrium of liquid conducting masses charged with electricity // *Phil. Mag.* 1882. V. 14. P. 184–186.
7. Hendricks C.D., Schneider J.M. Stability of conducting droplet under the influence of surface tension and electrostatics forces // *Am. J. Phys.* 1963. V.31. P. 450–453.
8. Tsamopoulos J.A., Brown R.A. Nonlinear oscillation of inviscid drops and bubbles // *J. Fluid Mech.* 1983. V. 127. P. 519–537.
9. 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.
10. Tsamopoulos J.A., Brown R.A. Resonant oscillations of inviscid charged drop // *J. Fluid Mech.* 1984. V.147. P. 373–395.
11. Tsamopoulos J.A., Akylas T.R., Brown R.A. Dynamic of charged drop break-up // *Proc. Roy. Soc. London*, 1985. V.A401. P. 67–88.
12. Basaran O.A., Scriven L.E. Axisymmetric shapes and stability of isolated charged drops // *Phys. Fluids A*. 1989. V.1. № 5. P. 795–798.
13. Natarayan R., Brown R.A. The role of three-dimensional shapes in the break-up of charged drops // *Proc. Roy. Soc. London*, 1987. V.A410. P. 209–227.
14. Григорьев А.И., Ширяева С.О. Критические условия неустойчивости сплюснутой сфероидальной сильно заряженной капли // *ЖТФ*. 1999. Т.69. Вып. 7. С. 10–14.
15. Шукин С.И., Григорьев А.И. Устойчивость заряженной капли, имеющей форму трехосного эллипсоида // *ЖТФ*. 1998. Т.68. Вып. 11. С. 48–52.
16. Pelekasis, Tsamopoulos J.A., Manolis G.D. Equilibrium shapes and stability of charged and conducting drops // *Phys. Fluids*. 1990. V.A2. № 8. P. 1328–1340.
17. Feng Z. Instability caused by the coupling between non-resonant shape oscillation modes of a charged conducting drop // *J. Fluid Mech.* 1997. V. 333. P. 1–21.
18. 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.
19. Белоножко Д.Ф., Григорьев А.И. Автоколебательная неустойчивость свободной поверхности вязкоупругой среды // *Письма в ЖТФ*. 1999. Т.25. Вып. 15. С. 41–45.
20. Варшалович Д.А., Москалев А.Н., Херсонский В.К. Квантовая теория углового момента. Л., 1975.
21. Feng Z.C., Leal L.G. Translational instability of a bubble undergoing shape oscillations // *Phys. Fluids*. 1995. V. 7. № 6. P. 1325–1336.
22. Ширяева С.О., Григорьев А.И., Григорьева И.Д. Характерное время развития неустойчивости сильно заряженной капли // *ЖТФ*. Т. 65. Вып. № 9. С. 39–45.
23. Ширяева С.О., Григорьев А.И., Григорьева И.Д. Об устойчивости капиллярных колебаний слабо сфероидальной заряженной капли // *ЖТФ*. 1996. Т. 66. Вып. 9. С. 12–20.

24. Григорьев А.И., Ширяева С.О. Закономерности рэлеевского распада заряженной капли // ЖТФ. 1991. Т.61. Вып. 3. С. 19–28.

Поступила 21.09.2000

Summary

At investigation in a square-law approximation on amplitude of capillary oscillations of a heavily charged drop is shown, that in a cause of interaction of various modes of capillary oscillations the losses of a stability by a drop having a charge smaller then critical, can be initiated by virtual excitation not only basic, but any of modes or linear combination of several arbitrary modes. The analysis of regularities of formation of a linear combination of several arbitrary modes. The analysis of regularities of formation of a spectrum of modes and losses of a stability by some their them, excited owing to interaction in the second order of smallness of several modes is carried spent, which perturbation is set in an initial instant.

В.В. Шамко, В.Г. Жекул, С.Г. Поклонов, И.С. Швец

ОПИСАНИЕ ДИНАМИКИ РАЗРЯДА В ВОДОНЕФТЯНЫХ ЭМУЛЬСИЯХ В ИСКРОВОМ ПРИБЛИЖЕНИИ

*Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины,
пр. Октябрьский, 43 А, г. Николаев, 540018, Украина*

Искровым приближением называют полуэмпирический подход к описанию состояния разрядной плазмы, в основу которого положена линейная зависимость между удельной внутренней энергией ω и проводимостью σ плазмы [1–3]

$$\omega = A \sigma, \quad (1)$$

где A – искровая постоянная, зависящая от свойств среды, в которой осуществляется разряд. Если энергию выразить через давление P и эффективный показатель адиабаты γ плазмы [4], то окажется, что между P и σ также существует линейная зависимость

$$P = (\gamma - 1) A \sigma. \quad (2)$$

Впервые эти закономерности были установлены для разрядов в газах [1], а несколько позже – для подводных искровых разрядов [2] и электрического взрыва в жидких и твердых диэлектриках [3]. Как показал впоследствии анализ [5], выполненный для подводной искры, функциональная зависимость $\sigma = \sigma(P)$ имеет более сложный вид и может быть представлена многочленом четвертой степени относительно P . Однако при характерном для разрядов в воде диапазоне давлений $50 \leq P \leq 400$ МПа отклонение значений σ , вычисленных по линейной зависимости [2], от рассчитанных по более точному сплайн представлению [5] не превышает 23% (табл. 1). Величина этого отклонения характеризует меру погрешности искрового приближения.

Таблица 1. Сравнение расчета по линейной (2) и нелинейной [5] зависимостям

| $10^{-8}P$, Па | | 0,50 | 0,75 | 1,00 | 1,25 | 1,50 | 2,00 | 2,50 | 3,00 | 4,00 |
|---------------------------|----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| $10^{-3}\sigma$, См/м | ф-ла (2) | 7,69 | 11,5 | 15,4 | 19,2 | 23,1 | 30,8 | 38,5 | 46,2 | 61,5 |
| | [5] | 9,32 | 14,6 | 19,9 | 25,0 | 29,6 | 37,4 | 42,9 | 46,8 | 57,6 |

По аналогии с [1,2] для искровой постоянной водонефтяных эмульсий может быть записана следующая формула

$$A = \left(\frac{3}{2}nkT + \sum_i w_{0i}n_{0i} + \sum_j w_{1j}n_{ej} \right) / (e\mu_e n_e). \quad (3)$$

Здесь w_{0i} – энергия диссоциации, одной молекулы i -го сорта; w_{1j} – энергия ионизации атомов j -го сорта; n_{ej} – концентрация электронов вследствие ионизации атомов j -го сорта; n , n_e – общая концентрация частиц и электронов соответственно, μ_e , e – подвижность и заряд электрона. Однако уже для разрядов в воде оценка искровой постоянной по формуле типа (3) давала только порядок ее величины, вычисляемой по экспериментальным данным [2]. Для эмульсий погрешность такого расчета будет еще больше из-за существенного усложнения структуры жидкости. Поэтому для реальных сред, не относящихся к классу простых жидкостей, целесообразно рассматривать A как подгоночный параметр и выполнять его расчет, исходя (как и ранее для подводной искры [2]), из уравнения баланса энергии в разрядном канале:

$$A_k = \left[\int_0^{t_k} i^2 R dt - 2(\gamma - 1)l^2 \sum_{j=1}^{k-1} A_j \int_0^{t_j} \dot{a}(aR)^{-1} dt \right] \times \\ \times \left[l^2 R^{-1}(t_k) + 2(\gamma - 1)l^2 \int_{t_{k-1}}^{t_k} \dot{a}(aR)^{-1} dt \right]^{-1}, \quad (4)$$

где i – разрядный ток; R – активное сопротивление плазменного канала; l – длина разрядного промежутка; γ – эффективный показатель адиабаты разрядной плазмы; a и \dot{a} – радиус и скорость расширения канала разряда.

Таким образом, для расчета искровой постоянной по рекуррентной формуле (4) следует наряду с током и сопротивлением иметь информацию о законе расширения разрядного канала. Водонефтяные эмульсии, в которых осуществляется разряд при обработке скважин [6], являются непрозрачными жидкостями и поэтому для них не удастся определить параметр A по соотношению (4) из-за невозможности регистрации радиуса канала. Для решения поставленной задачи воспользуемся тогда уже оправдавшей себя в ряде случаев [1–3] для сред, плазма которых подчиняется закономерностям (1), (2) приближенной нелинейной зависимости активного сопротивления от разрядного тока

$$R^2 = Al^2 / 2 \int_0^t i^2 dt. \quad (5)$$

Эта зависимость более точно выполняется для сред, у которых работа расширения плазменного канала является пренебрежимо малой по сравнению с введенной в него электрической энергией. Следовательно, в соответствии с уравнением (4), по мере увеличения доли работы (за которую ответственны вторые члены в квадратных скобках 4) определенное по приближенной зависимости (5) значение искровой характеристики будет завышенным. То есть, вычисленное по (5) значение A должно быть скорректировано. Величина корректировочного коэффициента k_A находилась для близкой к водонефтяной эмульсии по плотности среды, в качестве которой использовалась дистиллированная вода. В последней осуществлялся электрический разряд с синхронной регистрацией разрядного тока, напряжения на разрядном промежутке U и радиуса плазменного канала. Для стабилизации пробоя и геометрии плазменного канала осуществлялось инициирование разряда микропроводником ($\varnothing = 3$ мкм). Вычисляя искровую характеристику по формуле (4) и получаемой из (5) рекуррентной формуле

$$A_k = \frac{2R_k^2}{l^2} \int_0^{t_k} i^2 dt, \quad (6)$$

находим величину усредненного корректировочного коэффициента, на который необходимо будет разделить определенное по формуле (6) усредненное значение искровой постоянной. Соответствующие экспериментальные и расчетные данные для колебательного ($l=0,02$ м) и околокритического ($l=0,12$ м) разрядов приведены в табл. 2.

Средние квадратичные значения искровой постоянной для каждого из режимов составляют $A_{(4)}^I = 0,27$; $A_{(6)}^I = 0,38$; и $A_{(4)}^{II} = 0,25$; $A_{(6)}^{II} = 0,35$ соответственно, а их отношение $k_A = A_{(6)}^I / A_{(4)}^I \approx 1,40$. Величина k_A несколько больше для колебательных режимов разряда ($j=I$) и меньше для околокритических ($j=II$). Поскольку доля работы расширения разрядного канала от введенной в него электрической энергии определяется главным образом плотностью среды, в которой осуществляется разряд [1-4], то полученное значение коэффициента k_A может быть сохранено для любых жидкостей с мало отличающимися от воды плотностями.

И тогда по экспериментально регистрируемому току и напряжению разряда в водонефтяных эмульсиях искровая характеристика с учетом соотношения (6), корректировки и замены $R = U / i$ может быть вычислена по уточненной формуле

$$A_k \approx \frac{1,43}{l^2} \frac{U_k^2}{i_k^2} \int_0^{t_k} i^2 dt. \quad (7)$$

Таблица 2. Результаты расчета искровой характеристики

| $U_0=44$ кВ, $C=3,2$ мкФ, $L=1,9$ мкГн, $l=0,02$ м: режим I | | | | | $U_0=40$ кВ, $C=3,2$ мкФ, $L=2,2$ мкГн, $l=0,12$ м: режим II | | | | |
|--|-------------|-------------|---------------------------|---------|---|-------------|-------------|---------------------------|---------|
| t , мкс | i , кА | U , кВ | $A_k, 10^5$ B^2c/m^2 | | t , мкс | i , кА | U , кВ | $A_k, 10^5$ B^2c/m^2 | |
| | | | ф-ла(4) | ф-ла(6) | | | | ф-ла(4) | ф-ла(6) |
| 0,50 | 11,3 | 5,90 | 0,18 | 0,43 | 0,61 | 0,92 | 35,6 | 0,23 | 0,54 |
| 0,99 | 22,7 | 4,54 | 0,25 | 0,38 | 1,22 | 2,68 | 31,7 | 0,32 | 0,53 |
| 1,49 | 32,8 | 3,74 | 0,30 | 0,38 | 1,83 | 5,58 | 27,2 | 0,34 | 0,48 |
| 1,98 | 40,4 | 3,02 | 0,27 | 0,35 | 2,44 | 9,55 | 23,3 | 0,32 | 0,43 |
| 2,48 | 46,2 | 2,66 | 0,27 | 0,35 | 3,05 | 14,2 | 19,9 | 0,31 | 0,38 |
| 2,98 | 50,0 | 2,35 | 0,28 | 0,37 | 3,66 | 18,6 | 17,1 | 0,30 | 0,36 |
| 3,48 | 51,2 | 2,09 | 0,28 | 0,38 | 4,27 | 22,5 | 14,8 | 0,29 | 0,34 |
| 3,98 | 50,8 | 1,87 | 0,28 | 0,40 | 4,88 | 25,5 | 12,7 | 0,28 | 0,32 |
| 4,46 | 48,3 | 1,58 | 0,28 | 0,38 | 5,49 | 27,2 | 10,9 | 0,26 | 0,30 |
| 4,96 | 43,7 | 1,40 | 0,29 | 0,42 | 6,10 | 27,5 | 9,5 | 0,26 | 0,30 |
| 5,46 | 38,7 | 1,15 | 0,28 | 0,40 | 6,71 | 26,8 | 8,2 | 0,26 | 0,29 |
| 5,96 | 31,4 | 0,94 | 0,29 | 0,43 | 7,32 | 25,1 | 6,8 | 0,24 | 0,27 |
| 6,46 | 23,5 | 0,65 | 0,27 | 0,38 | 7,93 | 22,4 | 5,6 | 0,23 | 0,26 |
| 6,96 | 14,7 | 0,43 | 0,29 | 0,44 | 8,54 | 18,4 | 4,6 | 0,23 | 0,28 |
| | | | | | 10,97 | 5,05 | 1,4 | 0,23 | 0,35 |

Результаты соответствующего расчета по (7) для водонефтяной эмульсии на основе нефти плотностью $\rho_n=937$ кг/м³ (Павловское месторождение Пермской области) обводненностью $\phi=0,32-0,48$ и соленой воды различной начальной электропроводности σ_0 представлены в табл. 3.

Таблица 3. Расчетные значения искровой постоянной для водонефтяных эмульсий различной обводненности и воды различной электропроводности

| ϕ | 0,32 | 0,40 | 0,48 | 1,0 | 1,0 |
|-----------------------|------|------|------|------|------|
| σ_0 , См/м | 0,83 | 0,83 | 0,83 | 0,07 | 0,28 |
| A , $10^5 B^2c/m^2$ | 2,6 | 2,9 | 3,2 | 2,8 | 3,4 |

Осуществлялся режим разряда с напряжением $U_0=30$ кВ, емкостью конденсаторной батареи $C=2,3$ мкФ, индуктивностью контура $L=4,9$ мкГн и длиной разрядного промежутка $l=0,032$ м. Легко видеть, что зависимость искровой постоянной данной водонефтяной эмульсии от обводненности является линейной

$$10^5 A = 1,40 + 3,75 \varphi. \quad (8)$$

В формуле (8) размерность величины A берется в системе СИ, а φ , как и в табл. 3, в абсолютных единицах. Полагая, что искровая постоянная эмульсии A_3 обладает свойством аддитивности относительно основных ее составляющих

$$A_3 = (1 - \varphi)A_1 + \varphi A_2, \quad (9)$$

на основе данных табл. 3 получаем оценку значений искровой постоянной нефти $A_1=1,4 \cdot 10^5$ В²с/м² и пластовой воды ($\sigma_0=0,83$ См/м) $A_2=5,2 \cdot 10^5$ В²с/м². В результате искровая постоянная нефти оказалась большей соответствующего значения A для дистиллированной воды, которое при иницировании разрядов высоким напряжением составляет 10^5 В²с/м² [2].

Неожиданным результатом явилось увеличение более чем в три раза искровой постоянной для соленой воды по сравнению с дистиллированной. Ранее [2] априори считалось, что для воды с $\sigma_0 \leq 0,2$ См/м величина A не изменяется. Результаты же настоящих исследований свидетельствуют о зависимости A от проводимости среды. Пока остается открытым вопрос о пороговом значении σ_0 , начиная с которого эта зависимость проявляется. Такое резкое изменение A для подсолненной воды в соответствии с зависимостью (3) обусловлено меньшими значениями подвижности электронов в плазме, где присутствуют атомы и ионы щелочных металлов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мик Дж.М., Крэгс Дж.Д. Электрический пробой в газах. М., 1960.
2. Кривицкий Е.В., Шамко В.В. Переходные процессы при высоковольтном разряде в воде. Киев, 1979.
3. Семкин Б.В. Электрический взрыв в конденсированных средах. Томск, 1979.
4. Наугольных К.А., Рой Н.А. Электрические разряды в воде. М., 1971.
5. Ершов А.П., Куперитох А.Л. Исследование канальной стадии подводного электрического разряда. // Нестационарные проблемы гидродинамики. В. 48. Новосибирск, 1980. С. 54–60.
6. Жекул В.Г., Поклонов С.Г., Ткаченко А.К., Трофимова Л.П. Пути стабилизации параметров разрядов и снижение предпробивных потерь в скважинных электроразрядных устройствах // Физика импульсных разрядов в конденсированных средах. Тез. докл. VIII научн. школы. Николаев, 1997. С. 27.

Поступила 10.07.2000

Summary

A spark approach is used for description of the discharge dynamics in water and oil emulsions. The approximate method for calculation of the spark constant which is the factor between plasma internal energy and conductivity is grounded on the base of the experimentally registered electric discharge volt-ampere characteristics in the emulsions. The influence the degree of oil saturation with water and the initial specific conductivity of water in the stratum upon the spark constant is shown. The results obtained will be useful for numerical simulation of the transient electric and hydrodynamic processes of the phenomenon under investigation.

ИССЛЕДОВАНИЯ ОСНОВНЫХ БАЗОВЫХ ОПЕРАЦИЙ ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНОЙ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ОБЪЕМНОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ МЕТАЛЛОВ

*Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины,
пр. Октябрьский, 43-А, г. Николаев, 327018, Украина*

Подводный электрический разряд достаточно активно используется для листовой штамповки [1] и совершенно недостаточно для интенсификации процессов объемного деформирования материалов [2, 3].

Существует несколько причин, сдерживающих развитие этого метода высокоскоростного деформирования материалов. Две из них очевидны: существование критических скоростей деформирования, после достижения которых материал разрушается; отсутствие экспериментальных данных о простейших, но базовых операциях объемного деформирования металлов в поле виброимпульсного воздействия подводных электрических разрядов.

Что касается критической скорости деформирования, то авторами [4] теоретически показано, что она существует только для одноосного растяжения. При динамическом сжатии скорость распространения пластической деформации не обращается в нуль даже при равенстве нулю динамического модуля упрочнения. Кроме того, экспериментально было установлено [2], что при растяжении стандартных образцов из стали Ст.3 в поле последовательности импульсов упругих колебаний, которые генерирует электроразрядный генератор упругих колебаний (ЭРГУК), относительное удлинение увеличивается на 25-37%. При этом образуется и утоняется шейка.

Расплющивание свинцовых образцов между стальными калеными плитами в статическом режиме приводит к множественным радиальным разрывам деформируемого металла. Такие же свинцовые образцы при таком же расплющивании, но в поле последовательности импульсов упругих колебаний, не только расплющиваются без единого разрыва, а просто вытекают из-под плит. Это прямые доказательства увеличения пластичности металлов под воздействием высокоинтенсивных импульсов упругих колебаний.

Таким образом, созданы предпосылки интенсификации процессов объемного деформирования металлов. Однако, как влияют мощные импульсы упругих колебаний на основные базовые операции объемной обработки металлов давлением, не было выяснено.

В наших экспериментальных исследованиях упругие колебания в очаг деформации подавались от ЭРГУК, который закреплялся на подштамповой плите так, что импульсы передавались непосредственно в технологический узел. Этот метод называют общим названием “метод виброимпульсной интенсификации процессов обработки материалов давлением”. В целом лабораторное оборудование было аналогичным описанному в [2]. ЭРГУК представлял электроразрядную камеру с жесткими стенками и эластично-подвижным элементом, передающим импульс упругих колебаний во внешнюю среду. Последний был выполнен в виде стальной плиты, соединенной с корпусом ЭРГУК посредством эластичной кольцевой подвески из листовой вакуумной резины. Энергия в импульсе до 1 кДж, частота следования импульсов до 50 Гц. Общий импульс ЭРГУК характеризуется крутым передним фронтом и выпуклым спадом, что обеспечивает его широкополосность от 25 до 120 000 Гц. Основная (до 90%) энергия выносится в интервале частот 1000–3500 Гц.

Были выполнены сравнительные исследования виброимпульсного метода нагружения со статическим, пульсирующим и падающим грузом (вертикальный копер) при испытаниях на растяжение стандартных образцов из отожженной и неотожженной конструкционной стали 45.

Наибольшее относительное удлинение и относительное сужение получены при нагружении импульсами ЭРГУК с энергией 500 Дж, частотой следования – 30 Гц. Статическое усилие при этом было нулевым. Наименьшее значение эти характеристики имели в случаях статического нагружения

и нагружения пульсацией силы, создаваемых гидропульсатором машины МУП-20. Промежуточное положение занимает нагружение серией ударов падающего груза на копре. В среднем степень деформации при нагружении импульсами ЭРГУК по отношению к статическому нагружению увеличилась на 52%.

Рекогносцировочные исследования по осаживанию стальных (сталь 20 в состоянии поставки) образцов выполнялись на прессе ПММ-125 с ЭРГУК. Энергия в импульсе варьировалась от 750 до 1000 Дж. Осадка производилась в приспособлении, позволявшем резко уменьшить контактное трение путем введения смазки.

Образцы, осаживаемые с наложением импульсов ЭРГУК, имеют в среднем большую степень деформации на 16–20 % и меньшее упрочнение (по измерениям твердости контактных поверхностей). Кроме того, существенно сокращается время достижения заданной деформации. Главное же, что удалось установить – это снижение статического усилия деформирования практически до нуля (рис. 1).

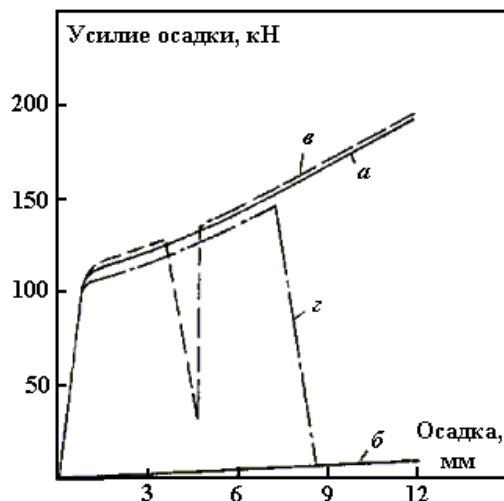


Рис. 1. Изменение усилия осадки от ее величины: а – статический режим; б – ЭРГУК включен с начала процесса осаживания; в – статический режим с наложением одиночного импульса ЭРГУК; г – после фазы чисто статического деформирования, ЭРГУК включен до конца осаживания.

Система статического нагружения образцов при этом очень гибко реагирует на включение ЭРГУК немедленным снижением усилия осадки. Снижение усилия наблюдается как при увеличении энергии в импульсе, так и при увеличении частоты посылок импульсов. Последний фактор носит более быстрый характер до частот 30–35 Гц, а после 40 Гц значительно (примерно в 2 раза) уменьшается.

Объяснить снижение усилия при нагружении совместно статическим усилием и импульсами ЭРГУК можно прерывистостью нагружения системы с инерционными свойствами.

Рассмотрим для определенности, например, осадку образца от высоты h_i до высоты h_j за один импульс при скорости подъема стола пресса v и частоте посылок импульсов f . Так как длительность импульса, в течение которой возникает деформация $\Delta h = h_i - h_j$, мала по сравнению с периодом импульса T , то предположим, для упрощения, что деформация Δh возникает мгновенно, после чего упругий элемент ЭРГУК возвращается в исходное положение. Если $v \leq \Delta h/T$, то $p_{ст} = 0$ в течение всего T . При $v > \Delta h/T$ статическое усилие будет приложено в течение части α периода T .

Для того, чтобы статическое усилие вновь было приложено к образцу, необходимо столу пройти путь $\Delta h = (1 - \alpha)T$, (здесь T – время, в течение которого статическое усилие $p_{ст} = 0$), что очевидно.

Игнорируя переходные процессы, можно принять, что образом статического движения является прямоугольный импульс, ограниченный передними фронтами каждых двух импульсов ЭРГУК. То есть, растягивая импульс статического давления на период T , получим кажущееся усилие p_ϕ . Из равенства импульсов $p_{ст} \alpha T = p_\phi T$ получим важное отношение $p_\phi/p_{ст} = \alpha$. В то же время из выражения для Δh находим $\alpha = 1 - \Delta h f/v$. Так как $f = 1/T$, то $p_\phi/p_{ст} = 1 - \Delta h f/v$.

Это последнее выражение применимо для всех видов обработки давлением при наличии деформации, совпадающей по направлению с приложенным статическим усилием и позволяет

приблизительно оценить влияние главных факторов на снижение рабочего усилия пресса. Снижение усилия будет тем больше, чем выше частота посылок импульсов, больше величина деформации на импульс (амплитуда основного импульса ЭРГУК) и меньше скорость хода стола. Отсюда видна роль ЭРГУК – он должен создать усилие (самостоятельно или в сложении с усилием пресса), необходимое для пластического деформирования в очаге деформации.

При больших деформациях, создаваемых только ЭРГУК и при соответствующих частоте и скорости хода стола, усилие пресса может быть снижено на 100 % и его роль сводится только к подаче стола с заготовкой к ЭРГУК. При этом необходимо отметить, что с увеличением степени деформации, деформация за импульс уменьшается и в пределе становится равной нулю. Снижение усилия в этом случае, при достаточной жесткости пресса, может не происходить. Отсюда и очевидна роль инерционных и упругих характеристик системы пресс – очаг деформации – ЭРГУК.

Однако следует учитывать, что кроме того виброимпульсное нагружение обуславливает улучшение условий течения металла, разблокирование дислокаций, быструю релаксацию касательных напряжений, интенсификацию других глубоко внутренних процессов в деформируемом металле.

Важными, основными (типовыми) операциями в процессах обработки металлов давлением являются объемная штамповка, выдавливание, вытяжка.

В этом плане были поставлены эксперименты по выяснению влияния импульсного электро-разрядного воздействия на снижение статического усилия пресса и увеличение допустимой степени деформации.

Эксперименты осуществлялись, как и при осаживании, на прессе ПММ-125, снабженном ЭРГУК. Штамповалась деталь типа “втулка с перемычкой”. Смазка – масло индустриальное 20.

На рис. 2 и в табл. 1 представлены некоторые результаты экспериментов.

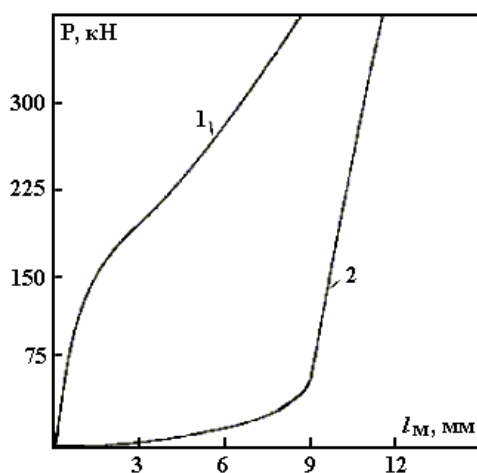


Рис. 2. Зависимость усилия пресса от деформации заготовки из сплава АМг-5: статическим усилием (1), статическим усилием с одновременным воздействием ЭРГУК (2).

Как видно из рисунков и таблицы при наложении импульсов ЭРГУК возникает снижение усилия пресса в течение всего процесса штамповки до величин деформаций, соответствующих статической деформации. При доведении усилия пресса в процессе штамповки с ЭРГУК до соответствующего статическому, деформации образцов увеличиваются. Соответственно снижение усилия деформирования составляет 35 %. Во всех случаях при наложении импульсов ЭРГУК наблюдалось лучшее заполнение штампа и меньшая высота облоя.

При аналогичных экспериментах с заготовкой из свинца статическое усилие пресса вообще не возникало. Полностью сформированные заготовки получались одним воздействием ЭРГУК за время меньше 1,6 с при частоте посылок импульсов 15 Гц. Кстати, свинец при нормальных условиях полностью моделирует сталь при температуре горячей обработки.

Так как обратное выдавливание по сравнению с прямым характеризуется более сложными и тяжелыми условиями работы инструмента и течения металла, именно ему было уделено основное внимание в наших экспериментах.

Выдавливались два вида образцов: с конической частью, рекомендуемой технологией статического выдавливания и с плоским дном, при котором условия течения металла ужесточаются. Материалы образцов: сталь специальная, медь МЗ, сплав АМг-5. Размеры стальных заготовок: диаметр – 26 мм, высота – 12,5 мм; медных и АМг-5 заготовок: диаметр – 25,5 мм, высота – 12,6 мм.

Таблица. 1. Результаты экспериментов по штамповке втулок из сплава АМг-5

| № образца | Высота, мм | Толщина перемещения, мм | Высота облоя, мм | Диаметр, мм | Диаметр облоя, мм | Усилие, кН | Число импульсов, ед | Динам. время, с | Частота, Гц | Режим обработки |
|-----------|------------|-------------------------|------------------|-------------|-------------------|------------|---------------------|-----------------|-------------|-----------------|
| 3 | 22,7 | 14,22 | 8,5 | 32,2 | 34,8 | 400 | – | – | – | Статический |
| 5 | 24,0 | 11,43 | 5,3 | 32,2 | 37,4 | 560 | – | – | – | Статический |
| 2 | 23,6 | 11,13 | 4,8 | 32,2 | 38,0 | 410 | 478 | 59,8 | 8 | Динамический |
| 4 | 24,4 | 10,22 | 3,5 | 32,2 | 40,4 | 590 | 884 | 60,0 | 14,7 | Динамический |

При воздействии только ЭРГУК в названных режимах без одновременного статического усилия деформация стальных образцов чрезвычайно мала. Это означает, что усилие, развиваемое ЭРГУК в выбранном режиме, недостаточно для пластической деформации образца принятых размеров. Влияние ЭРГУК на величину выдавливания увеличивается по мере возрастания статического усилия и наиболее заметно при достижении второй зоны текучести. В это время воздействие ЭРГУК положительно влияет на увеличение степени деформации образцов.

Так как деформация за один импульс очень мала, снижение усилия для стальных образцов не наблюдалось. Для образцов из меди и сплава АМг-5 соотношение усилия данного ЭРГУК и усилия, необходимого для пластической деформации более благоприятны. И те, и другие образцы удавалось выдавливать только действием ЭРГУК. Однако в сочетании со статическим усилием, как меньшим предела текучести примерно в 2 раза, так и при равном ему, процесс выдавливания значительно ускоряется, а достигаемая степень деформации существенно увеличивается. При этом происходит также снижение усилия пресса, как это видно на диаграмме рис. 3.

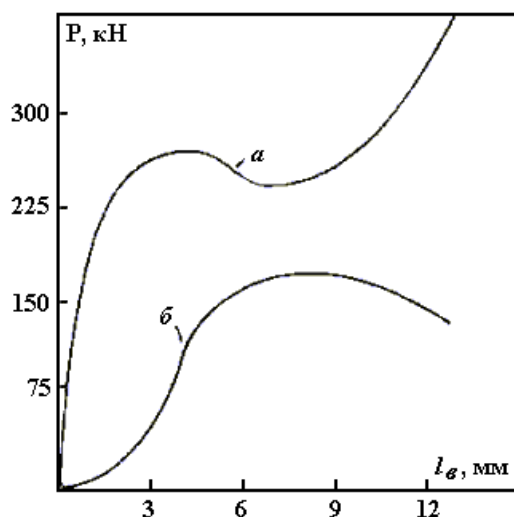


Рис. 3. Зависимость усилия пресса от деформации при обратном выдавливании медных образцов: при статическом усилии (а), статическое усилие плюс ЭРГУК (б).

Кроме экспериментов по обратному выдавливанию были проведены эксперименты по выдавливанию полостей штампов с помощью мастер-детали. Выдавливание производилось в плите из стали марки Ст.3 с твердостью поверхности по Бринелю – НВ = 110, по HRB – 56.

В качестве мастер-детали использовались: шарик диаметром 15,96 мм, ролик конический со средним диаметром 12,96 мм и длиной 22,5 мм, ролик бочкообразный конический с диаметром оснований 16,5 и 16,0 мм, средним диаметром 16,98 мм и длиной 15,0 мм, а также сложная конфигурация

в виде шестерни с числом зубьев 15 и наружным диаметром 20 мм, имеющая отверстие в центре. Ролики вдавливались и образующей, и торцами.

Все опыты по выдавливанию производились с одним и тем же статическим усилием прессы – 180–200 кН. Частота ЭРГУК – 22–26 Гц.

Для оценки эффективности процесса виброимпульсного выдавливания по сравнению со статическим выполнялось сравнение объемов выдавленных полостей при равных статических усилиях. Выдавливание цилиндрической полости торцом ролика

$$\Delta V/V = (V_2 - V_1)/V_1 = (h_2 - h_1)/h_1 = (\Delta h/h_1)100\%,$$

где V_1 – объем полости при статическом нагружении; V_2 – объем полости при виброимпульсном выдавливании.

Для ролика диаметром 16,98 мм : $\Delta h/h_1 = (1,6 - 0,8)/0,8 = 100\%$; для ролика диаметром 12,69 мм : $\Delta h/h_1 = (3,5 - 2,5)/2,5 = 40\%$.

Зная твердость материала плиты по Бринелю, диаметр вдавливаемого шарика и диаметр отпечатка, можно определить усилие вдавливания в обоих случаях нагружения. В случае статического нагружения – это будет максимальное действительное усилие, а в случае совместного действия статического усилия и импульсного (ЭРГУК) – усилие определенное таким образом, будет равняться статическому усилию, которое могло бы дать отпечаток, соответствующий полученному в эксперименте.

Число твердости по Бринелю

$$HB = \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}.$$

Отсюда

$$P = 0,5\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})HB.$$

Здесь P – усилие вдавливания; D – диаметр шарика; d – диаметр отпечатка; HB – число твердости по Бринелю.

Определив P по двум отпечаткам, полученным при чисто статическом и при совместном действии статического и импульсного усилий, по их разности $\Delta P = P_2 - P_1$, можно найти эффект снижения усилия. В нашем случае $P_1 = 14,8 \cdot 10^3$ Н, $P_2 = 20,5 \cdot 10^3$ Н. Таким образом пересчетное снижение усилия составляет $5,7 \cdot 10^3$ Н или относительное снижение усилия – 27,8%.

В табл. 2 приведены результаты по выдавливанию полостей в стальной плите мастер-деталью.

Из табл. 2 и примеров расчета видно, что виброимпульсное выдавливание значительно эффективнее статического.

Наконец, самостоятельная пара основных операций электроразрядной интенсификации объемного деформирования металлов – это калибровка и улучшение чистоты поверхности.

Для определения возможности улучшения качества поверхности при операциях калибровки изделий в штампах были изготовлены образцы из отожженной стали У8А в виде пластинок $40 \times 15 \times 4$ мм³, обработанных с одной стороны с чистотой поверхности по 3 классу, а с другой – по 5–6 классу. Образцы устанавливались в приспособление для осадки между плоскими бойками, рабочие поверхности которых имели чистоту по 7 классу. Обработка образцов производилась на прессе ПММ-125, снабженном ЭРГУК. Класс чистоты поверхности определяли с помощью профилографа модели 201 завода “Калибр” и сравнивали с эталонами чистоты.

Как известно, при статическом сдавливании шероховатость поверхности снижается значительно меньше, чем при сдавливании микронеровностей с одновременным перемещением инструмента поперек или вдоль рисок микронеоднородности. Этому способствуют силы трения между инструментом и деталью, изменяющие в таком случае схему напряженного состояния материала гребешков и создающие иное, более благоприятное направление деформации. ЭРГУК по принципу своей работы генерирует и касательную составляющую нагрузки и, следовательно, при виброимпульсной обработке силы трения должны оказывать меньшее сопротивление деформированию гребешков. Именно этому способствует тангенциальное смещение инструмента относительно поверхности заготовки. Такие предпосылки полностью подтвердились положительными результатами обработки образцов. Экспериментальные данные приведены в табл. 3.

Таблица 2. Результаты выдавливания полостей различным нагружением

| Характеристика вдавливаемого тела | Характеристика выдавленной полости | Режим выдавливания |
|---|---|---|
| Шар $D = 15,96$ мм | Диаметр 13,5 мм Глубина 3,5 мм | Статический $p=5 \cdot 10^6$ Па |
| Шар $D = 15,96$ мм | Диаметр 14,6 мм Глубина 4,2 мм | Статический $p=5 \cdot 10^6$ Па плюс ЭРГУ(40 кВ; 21,7 Гц) |
| Торец ролика $D = 16,98$ мм | Диаметр 17,0 мм Глубина 0,8 мм | Статический $p=5 \cdot 10^6$ Па |
| Торец ролика $D = 16,98$ мм | Диаметр 17,0 мм Глубина 1,6 мм | Статический $p=5 \cdot 10^6$ Па плюс ЭРГУК(40 кВ; 24 Гц) |
| Боковая поверхность ролика $D = 16,98$ мм | Наибольшая ширина 11,8 мм Глубина 2,7 мм | Статический $p=5 \cdot 10^6$ Па |
| Боковая поверхность ролика $D = 16,98$ мм | Наибольшая ширина 13,0 мм Глубина 3,1 мм | Статический $p=5 \cdot 10^6$ Па плюс ЭРГУК(36 кВ; 23 Гц) |
| Торец ролика $D = 12,69$ мм | Диаметр 12,7 мм Глубина 2,5 мм | Статический $p=5 \cdot 10^6$ Па |
| Торец ролика $D = 12,96$ мм | Диаметр 12,7 мм Глубина 3,5 мм | Статический $p=5 \cdot 10^6$ Па плюс ЭРГУК(40 кВ; 24 Гц) |
| Боковая поверхность ролика $D = 12,69$ мм | Наибольшая ширина 8,5 мм Глубина 1,3 мм | Статический $p=5 \cdot 10^6$ Па |
| Боковая поверхность ролика $D = 12,69$ мм | Наибольшая ширина 9,7 мм Глубина 2,0 мм | Статический $p=5 \cdot 10^6$ Па плюс ЭРГУК(40 кВ; 21 Гц) |
| Шестерня $D = 20$ мм | Диаметр 20 мм Глубина 0,5 мм | Статический $p=5 \cdot 10^6$ Па |
| Шестерня $D = 20$ мм | Диаметр 20 мм Глубина 0,75 мм | Статический $p=5 \cdot 10^6$ Па плюс ЭРГУК(36 кВ; 26 Гц) |

Таблица 3. Экспериментальные данные по улучшению поверхности образцов У8А

| № образца | T_0 , мм | T_1 , мм | ε , % | P , Н | U_0 , кВ | n , ед. | τ , с | f , Гц | HRB начальное | HRB конечное | Кл. ш. до обработки | Кл. ш. после обработки |
|-----------|------------|------------|-------------------|---------|------------|-----------|------------|----------|---------------|--------------|---------------------|------------------------|
| контроль | 4,05 | – | – | – | – | – | – | – | 92,5 | – | 3 | – |
| 3 | 3,96 | 3,89 | 1,77 | 600 | – | – | – | – | 92,5 | – | 3 | 7а |
| 9 | 3,82 | 3,53 | 7,60 | 600 | – | – | – | – | 92,5 | 95,6 | 3 | 7 |
| 6 | 3,86 | 3,58 | 7,26 | – | 34 | 113 | 5,0 | 22,6 | 92,5 | 94,3 | 3 | 7-8 |
| 1 | 4,04 | 3,94 | 2,48 | – | 33 | 91 | 9,45 | 9,1 | 92,5 | 94,5 | 3 | 5-6 |
| 2 | 4,01 | 3,92 | 2,24 | – | 31,5 | 202 | 18,6 | 10,8 | 92,5 | 95,8 | 3 | 6б |
| 4 | 3,95 | 3,75 | 5,07 | 600 | 35 | 171 | 18,82 | 9,1 | 92,5 | 95,8 | 3 | 7б |
| 5 | 4,02 | 3,74 | 6,98 | 600 | 35 | 144 | 19,0 | 7,6 | 92,5 | 95,8 | 3 | 8а |
| 7 | 3,90 | 3,49 | 10,5 | 600 | 35 | 113 | 5,2 | 21,8 | 92,5 | 95,8 | 3 | 8а |

Примечание: T_0 – начальная толщина образца; T_1 – конечная толщина образца; ε – относительная степень деформации; P – статическая нагрузка; U_0 – напряжение зарядки; n – число импульсов ЭРГУК; τ – время работы ЭРГУК; f – частота следования импульсов; HRB – твердость; Кл.ш. – класс шероховатости.

Таким образом, объемное деформирование металлов по всем основным операциям может быть интенсифицировано электроразрядным воздействием на очаг деформации совмещенным со статическим воздействием. При этом повышается степень деформации, качество получаемых изделий, производительность действующего оборудования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мазуровский Б.Я., Сизев А.Н. Электрогидравлический эффект в листовой штамповке. Киев, 1983.
2. Корытов В.А., Малюшевский П.П. Применение электрического разряда в воде для интенсификации процессов обработки металлов давлением // Импульсные методы обработки материалов. Минск, 1977. С. 80–86.
3. Малюшевский П.П. Основы разрядно-импульсной технологии. Киев, 1983.
4. Барановский М.А., Стрикель Н.И., Короткевич В.Г. Распространение пластической деформации при высокоскоростном растяжении и сжатии металлических материалов // Импульсные методы обработки материалов. Минск, 1977. С. 148–152.

Поступила 09.10.2000

Summary

Basic operation's of electrodischarge intensification of voluminous deformation of metals research. Experimental research of basic operations of electrodischarge intensification of voluminous deformations of metals was worked out: precipitation, squeezing, calibration, surface's cleanliness improvement. It was determined that voluminous deformation of metals by basic operation can be intensified with electrodischarge influence to the hearth of deformation with static influence. Deformation's degree, quality of production, productivity of equipment increase.

А.Р. Ризун, В.М. Косенков

К ВОПРОСУ ОБ ОПРЕДЕЛЕНИИ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНОГО РАЗРУШЕНИЯ ХРУПКИХ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

*Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины,
Октябрьский пр-т, 43-а, 54018, г. Николаев-18, Украина*

Возможность разрушения хрупких неметаллических материалов практически любой прочностью электроразрядным способом является экспериментальным фактом [1]. Однако при разработке технологии важное, а часто и принципиальное значение имеет производительность электроразрядного разрушения (дробления) блоков хрупких материалов, имеющих максимальные размеры от 500 до 200 мм на фрагменты, не превышающие 3 мм. Под производительностью дробления будем понимать массу разрушенного до заданных размеров материала, проходящего через зону дробления за единицу времени. Время дробления блоков до заданных размеров главным образом зависит от их прочностных характеристик, параметров электрического разряда, частоты повторения разрядов, взаимного расположения осколков материала. Названные характеристики процесса дробления в большей или меньшей степени имеют статистический характер, поэтому выполнить расчет процесса дробления материала с детерминистических позиций не представляется возможным. Однако производительность электроразрядного дробления можно оценить на основе ряда предположений:

- трещины в осколках возникают вблизи мест их взаимного контакта вследствие концентрации напряжений;
- дробление материала происходит в результате превышения касательными напряжениями предела прочности материала на сдвиг (скалывание) [2];

© Ризун А.Р., Косенков В.М., Электронная обработка материалов, 2001, № 2, С. 45–50.

- в результате электрического разряда осколки материала, находящиеся в зоне дробления, делятся на две равные части;
- начальный объем осколков равен объему зоны дробления;
- объем зоны дробления V_d определяется расстоянием между электродами l и радиусом зоны дробления R_d , то есть

$$V_d = \pi \cdot l \cdot R_d^2 ; \quad (1)$$

– при достижении осколками заданных размеров (a_{min}) они удаляются из зоны дробления.

Учитывая принятые допущения, формулу оценки производительности дробления хрупких материалов электрическими разрядами можно получить в следующей логической последовательности.

Объем осколков после n разрядов будет составлять

$$V_n = V_d / 2^n , \quad (2)$$

тогда

$$n = \ln(V_d / V_n) / \ln 2 . \quad (3)$$

Начальный (a_0) и конечный (a_{min}) размеры осколков свяжем с их объемами соотношениями

$$a_0 = \sqrt[3]{V_d} ; a_{min} = \sqrt[3]{V_n} , \quad (4)$$

тогда формулу (3) можно преобразовать к виду

$$n = 1,443 \cdot \ln[(a_0 / a_{min})^3] . \quad (5)$$

При частоте электрических разрядов f осколки материала, находящиеся в объеме V_0 , достигают размеров a_{min} за время

$$t = n / f , \quad (6)$$

и вследствие этого объемный расход материала через зону дробления составит

$$V_R = V_d / t . \quad (7)$$

Учитывая, что разрядных промежутков может быть k , а плотность материала равна ρ , массовый расход материала через зону дробления (производительность дробления) определяется зависимостью

$$G_n = k \cdot \rho \cdot V_d / t , \quad (8)$$

или, учитывая (1) и (6), окончательно получим

$$G_n = \pi \cdot k \cdot \rho \cdot f \cdot l \cdot R_d^2 / [1,443 \cdot \ln(\pi \cdot l \cdot R_d^2 / a_{min}^3)] . \quad (9)$$

Анализ формулы (9) показывает, что производительность электроразрядного дробления хрупких неметаллических материалов определяется шестью параметрами. Пять из них зависят от условий электрического разряда и конструкции разрядной камеры. Определение их величин не представляет затруднений. Однако определение радиуса зоны дробления (R_d) вызывает ряд проблем и требует проведения предварительных исследований.

Величина R_d может быть определена на основе экспериментальных исследований или математического моделирования процесса дробления хрупких материалов.

Экспериментальное определение R_d производилось путем осуществления электрических разрядов в зазоре между двумя блоками хрупких материалов, имеющих форму параллелепипедов и отмеченных на рисунке цифрой 1. Разрядная камера 2 имела форму параллелепипеда (см. рисунок) с размерами, значительно превышающими радиус зоны дробления. На ее дно уложены плотно друг к другу два блока хрупких материалов. Величина зазора между ними определялась только размерами шероховатостей соприкасающихся поверхностей. Корпус разрядной камеры заземлен. К зазору между исследуемыми материалами подведен наконечник электрода 3, на который подается положительный заряд. Поверхность электрода (кроме наконечника) закрыта электрическим изолятором 4. Остальной объем разрядной камеры заполнен водой 5. После выполнения одного электрического

разряда в блоках хрупких материалов возникала сетка трещин. В качестве радиуса зоны разрушения материала принималось расстояние от вершины наконечника электрода до наиболее удаленной от него трещины. Для уменьшения погрешности измерений каждый опыт повторялся три раза. Перед очередным разрядом разрушенные блоки заменялись неразрушенными. В конденсаторной батарее запасали $E_0 = 2,5$ кДж энергии при напряжении $U_0 = 50$ кВ. Длина разрядного промежутка определялась толщиной блоков и составляла 35 мм. Измерения выполнялись для трех видов материалов, отличающихся главным образом пределами прочности на сжатие, составляющими 5, 12, 17 МПа. Измеренные радиусы разрушения материалов изменяются обратно пропорционально их прочности и достигают 49, 30, 27 мм соответственно. Воспользовавшись этими данными и формулой (9), получаем производительность процесса дробления 713, 530, 470 кг/час.

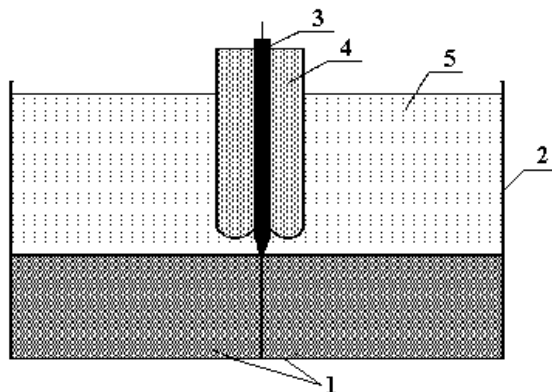


Схема эксперимента.

Математическое моделирование электроразрядного дробления хрупких неметаллических материалов может быть выполнено на основе известной и достаточно надежно апробированной математической модели динамики пористых насыщенных жидкостью сред [3–5].

При формулировке математической модели использован ряд традиционных допущений, что вполне оправдано для рассматриваемого круга проблем:

- пористая среда изотропна и насыщена однофазной вязкой сжимаемой жидкостью;
- материал матрицы пористой среды упрочняется за счет сил внутреннего трения по закону Кулона;

– начало процесса образования трещин отрыва соответствует условию первой теории прочности;

- образовавшиеся трещины не заполнены жидкостью;
- перенос загрязняющих поры веществ не влияет на деформирование и разрушение матрицы;
- остаточная объемная деформация матрицы пористой среды пренебрежимо мала.

Исходя из принятых допущений, система уравнений, описывающая процесс распространения возмущений в пористой насыщенной жидкостью среде, может быть представлена в виде

$$[(1-m)\rho_1]_t + [(1-m)\rho_1 u_i]_i = 0, \quad (10)$$

$$[m\rho_2]_t + [m\rho_2 w_i]_i = 0, \quad (11)$$

$$[(1-m)\rho_1 u_i]_t + [(1-m)\rho_1 u_j u_i]_j = \sigma_{ij,j}^f - (1-m)p_i - R_i, \quad (12)$$

$$[m\rho_1 w_i]_t + [m\rho_1 w_j w_i]_j = -mp_i + R_i, \quad (13)$$

$$\begin{aligned} & [(1-m)\rho_1(\varepsilon_1 + u_i u_i / 2)]_t + [(1-m)\rho_1(\varepsilon_1 + u_i u_i / 2)u_j]_j = \\ & = [\sigma_{ij}^f u_j]_j + \bar{W}_{u,t}, \end{aligned} \quad (14)$$

$$[m\rho_2(\varepsilon_2 + w_i w_i / 2)]_t + [m\rho_2(\varepsilon_2 + w_i w_i / 2)w_j]_j =$$

$$= [mpw_i]_{,i} + \bar{W}_{w,t} , \quad (15)$$

$$\bar{W}_{u,t} = -pm_{,t} - R_i u_i , \quad (16)$$

$$\bar{W}_{w,t} = -pm_{,t} - R_i w_i , \quad (17)$$

$$R_i = \mu_2 \frac{m^2}{k} f(Re)(u_i - w_i) , \quad (18)$$

$$Re = \frac{\rho_2}{\mu_2} \sqrt{\frac{k}{m}} |u - w| , \quad (19)$$

$$\sigma_{ij}^f = (1 - m) [S_{ij} - (\sigma - \varepsilon^* p) \delta_{ij} + \rho_{ij}] , \quad (20)$$

$$\dot{S}_{ij} = 2G \left(\dot{e}_{ij} + \frac{\dot{\rho}_1}{3\rho_1} \delta_{ij} \right) , \quad (21)$$

$$\dot{\rho}_{ij} = 2g e'_{ij} , \quad (22)$$

$$\varepsilon^* = \frac{K_u}{K} , \quad (23)$$

$$\dot{\sigma} = -K_u \dot{e} , \quad (24)$$

$$\sigma \geq -\frac{1}{3} \sigma_r , \quad (25)$$

$$\dot{e} = \dot{e}_{11} + \dot{e}_{22} + \dot{e}_{33} , \quad (26)$$

$$\dot{e}_{ij} = \frac{1}{2} (u_{i,j} + u_{j,i}) , \quad (27)$$

$$S_{11}^2 + S_{22}^2 + S_{33}^2 + 2(S_{12}^2 + S_{23}^2 + S_{31}^2) \leq \frac{2}{3} (\sigma_T + \alpha\sigma)^2 , \quad (28)$$

$$\sigma_T = \begin{cases} \sigma_r , & \text{при } \sigma < 0 \\ \sigma_{sg} , & \text{при } \sigma \geq 0 \end{cases} , \quad (29)$$

$$p = c_0^2 (\rho_2 - \rho_{20}) + (\kappa - 1) \rho_2 \varepsilon_2 , \quad (30)$$

$$p \geq p_s , \quad (31)$$

где $\rho_1, \rho_2, \rho_{10}, \rho_{20}$ – плотность материала твердой и жидкой фаз, соответственно в возмущенном и невозмущенном состояниях; m – пористость матрицы; u_i, w_i – компоненты вектора скорости твердой

и жидкой фаз ($i=1,2,3$); p – давление жидкости; σ_{ij}^f , S_{ij} – тензор и девиатор тензора эффективных напряжений; ε_1 , ε_2 – внутренняя энергия твердой и жидкой фаз; $f(Re)$ – функция влияния режима течения на межфазовое взаимодействие [3]; Re – число Рейнольдса для пористой среды; μ – коэффициент динамической вязкости жидкости; k – коэффициент проницаемости пористой среды; e_{ij} , e'_{ij} – полная и пластическая компоненты тензора деформаций; G – модуль сдвига матрицы; K_{lv} , K – модуль объемного сжатия матрицы и модуль объемного сжатия материала матрицы; σ – среднее напряжение в матрице; σ_r , σ_{sg} – предел текучести матрицы на сжатие и растяжение, соответственно; p_s – давление насыщенных паров жидкости; δ_{ij} – символ Кронекера; ρ_{ij} – тензор микронапряжений; g – модуль упрочнения матрицы; κ – эмпирический коэффициент жидкости; c_0 – скорость звука в невозмущенной жидкости; α – коэффициент внутреннего трения материала матрицы; (запятыя в индексах означают ковариантное дифференцирование, а точки над символами – производные по времени).

Уравнения (10)–(15) описывают законы сохранения массы, импульса и энергии в твердой матрице и насыщающей ее жидкости [3]. Межфазовое взаимодействие сред учитывается соотношениями (16)–(19) в соответствии с гипотезой Н.Е. Жуковского. Связь между деформациями и напряжениями устанавливается на основе обобщенного закона Гука (20) с использованием теории пластического течения (21). Поверхность пластического течения, с учетом упрочнения по закону Кулона, описывается модифицированным условием Губера-Мизеса (28) [6]. Скорости деформаций и перемещений связаны геометрическими соотношениями (27). Соотношения (24), (30) и (31) являются уравнениями состояния твердой и жидкой фаз.

Процесс разрушения от сжатия матрицы пористой среды происходит при выполнении условия

$$S_{11}^2 + S_{22}^2 + S_{33}^2 + 2(S_{12}^2 + S_{23}^2 + S_{31}^2) = \frac{2}{3}([\sigma]_{sg} + \alpha\sigma)^2, \quad (32)$$

где $[\sigma]_{sg}$ – предел прочности матрицы на сжатие.

Образование трещин отрыва, с приемлемой для практики точностью расчетов разрушения хрупких сред, происходит при выполнении условия первой теории прочности [7]

$$\sigma_{ii} \geq [\sigma]_r, \quad (33)$$

где $[\sigma]_r$ – предел прочности матрицы на растяжение.

Образующаяся при этом трещина перпендикулярна направлению наибольшего напряжения. Учитывая осевую симметрию задачи, можно утверждать о совпадении направлений наибольших и наименьших нормальных напряжений с координатными осями, вследствие чего образующиеся трещины также будут направлены параллельно координатным осям.

В области разрушения матрицы от сжатия, пределы прочности и текучести материала на растяжение полагаются равными нулю

$$[\sigma]_r = 0; \quad \sigma_r = 0. \quad (34)$$

В направлении, перпендикулярном трещине отрыва, предел прочности на растяжение равен нулю. Если берега трещины не контактируют между собой (ширина трещины $h_n > 0$), тогда перпендикулярные к ним нормальные компоненты напряжений (σ_n) полагаются равными нулю. При этом компоненты сдвиговых напряжений (σ_τ), направленные вдоль трещин, тоже равны нулю

$$\sigma_n = 0; \quad \sigma_\tau = 0. \quad (35)$$

Система уравнений (10) – (35) должна быть дополнена соответствующими начальными и граничными условиями. На непроницаемых поверхностях задаются условия непротекания

$$u_n = w_n, \quad (36)$$

где u_n , w_n – компоненты скоростей твердого тела и жидкости, нормальные к поверхности границы. На проницаемых поверхностях задаются условия типа “жидкий” поршень [3]

$$\sigma_{nm}^f = 0; \quad p_f = p_p, \quad (37)$$

где σ_{nn}^f – компонента тензора эффективных напряжений, нормальная к поверхности границы; p_f, p_p – давление жидкости в однофазной и пористой средах соответственно.

До начала электрического разряда окружающая среда находится в невозмущенном состоянии.

Параметры электрического разряда, а также давление жидкости на пористую среду (p_p) определялись согласно методике [8].

Решение системы уравнений (10)–(37) выполнялось по методу изложенному в работе [5]. В результате решения определялась величина радиуса зоны дробления, с помощью которого вычисляли производительность электроразрядного дробления по формуле (9). В качестве разрушаемого материала использовали карборундсодержащие плиты из доломита, миндлита и кварцита, прочностные характеристики которых приведены в работе [2].

В качестве примера, приведем результаты математического моделирования разрушения плиты карборундсодержащего материала, имеющего предел прочности на сжатие 17 МПа, а предел прочности на скалывание 0,9 МПа. Результаты расчетов и соответствующие им данные эксперимента приведены в таблице.

Результаты моделирования электроразрядного дробления материалов

| № п/п | E_0 , кДж | k | f , Гц | a_{min} , мм | R_d , мм | G_n , кг/час | |
|-------|-------------|-----|----------|----------------|------------|----------------|-------------|
| | | | | | | теория | эксперимент |
| 1 | 1,25 | 1 | 4 | 1 | 30,7 | 223 | - |
| 2 | 1,25 | 1 | 4 | 3 | 30,7 | 356 | - |
| 3 | 2,5 | 1 | 2 | 1 | 49 | 265 | - |
| 4 | 2,5 | 1 | 2 | 3 | 49 | 425 | 470 |

Удовлетворительное согласование теоретических и экспериментальных данных свидетельствует об адекватности математической модели реальным условиям дробления хрупких материалов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ризун А.Р. Технология разрушения неметаллических материалов электровзрывом // Тез. докл. “Электрический разряд в жидкости и его применение в промышленности”. Николаев, 1992. С. 175.
2. Лысенко М.П. Состав и физико-механические свойства грунтов. М., 1980.
3. Николаевский В.Н. Механика пористых и трещиноватых сред. М., 1984.
4. Быков И.Г., Николаевский В.Н. Нелинейные волны в пористых насыщенных средах // Докл. РАН. 1993. Т. 328. № 1. С. 35–38.
5. Косенков В.М. Математическая модель динамики пористых насыщенных жидкостью упругопластических сред при электрическом разряде в воде // Проблемы прочности. 1997. № 1.
6. Механический эффект взрыва в грунтах / Под ред. И.А. Лучко. Киев, Наукова думка, 1989.
7. Майнчен Дж., Сак С. Метод расчета “Тензор” // Вычислительные методы в гидродинамике. М., 1967. С. 185–211.
8. Методика расчета гидродинамических и электрических характеристик канала разряда электрогидравлических установок. / АН УССР. Проектно-конструкторское бюро электрогидравлики: Сост. Ризун А.Р., Иванов В.В., Рыбка О.М. Киев, 1982.

Поступила 25.11.2000

Summary

A method for crushing brittle non-metallic material output calculation is proposed. A number of assumptions the method is based upon are presented. Six parameters are determined to affect the output of crushing. It is ascertained that one of them (the radius of crushing zone) can not be given on the base of the material parameters or the parameters of the electric discharge installation. But it can be determined experimentally or by mathematical modeling of the crushing process. The methods of experiment and mathematical model for determination of the crushing zone radius are stated. The results of crushing productivity calculation obtained according to the method proposed agree satisfactorily with experimental data.

ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА БИОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ И ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ

С.Н. Маслоброд

ДИНАМИКА ЗЕРКАЛЬНОЙ СИММЕТРИЗАЦИИ ПАР РАЗНОВОЗРАСТНЫХ ПРОРОСТКОВ КУКУРУЗЫ, ИНДУЦИРОВАННАЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕМ ПО ГОРИЗОНТАЛИ СЕМЯН И ПРОРОСТКОВ

*Институт генетики АН РМ,
ул. Пэдурий, 20, г. Кишинев, MD-2002, Республика Молдова*

Ранее нами было обнаружено, что из пары семян, соприкасающихся зародышами, вырастают преимущественно зеркально симметричные проростки, то есть такая пара состоит из левого (*l*) и правого (*d*) проростков. Эффект возникает в результате электромагнитного взаимодействия прорастающих семян пары. Он присущ разным видам растений и зависит от генопары с разным сроком набухания семян [1, 2]. В последнем случае, по нашему мнению, зеркальная симметризация проростков пары определяется семенем с более высокой начальной физиологической активностью (с большим сроком набухания). По-видимому, биоизомерия (левизна или правизна) проростка, вырастающего из набухшего семени, в момент посадки его к сухому семени уже успевает оформиться, хотя и не проявляется визуально. Поэтому проросток из набухшего семени в состоянии “навязать” будущему проростку из второго семени биоизомерию противоположного знака.

В нашей работе была поставлена задача более детально изучить данный феномен, но использовать в качестве компонента-индуктора не семя, а проросток определенного возраста и с определенным знаком биоизомерии. При этом посадку сухого семени к проростку-индуктору приурочивать к моменту появления у этого проростка очередного листа, с тем чтобы морфогенез развивающегося листа объекта-индуктора совмещать по времени с морфогенезом первого листа объекта-приемника. В таком случае представляется возможность, во-первых, выяснить, существует ли между листьями индуктора и приемника электромагнитная связь в онтогенезе объекта-индуктора (характер и степень этой связи как раз можно оценить по эффекту зеркальной симметризации пар указанных листьев) и, во-вторых, полученные результаты обсудить в русле концепции морфогенетической роли биоэлектрического поля растительного организма [1, 2].

Для решения этой задачи целесообразно в качестве объекта исследования использовать проростки злаковых, в частности, кукурузы, у которой каждый очередной лист по сравнению с предыдущим имеет биоизомерию противоположного знака (рис. 1), что может отразиться на динамике эффекта зеркальной симметризации пар разновозрастных проростков.

Методика. Объекты исследования – проростки, полученные из семян гибрида кукурузы ПЗ978. Опыты проводили в теплице при температуре днем 24–28⁰С. Семена проращивали в почве (суглинистый чернозем + торф в отношении 3:1). Начальная процедура опыта: семена высаживали попарно одновременно, через два-три дня одно из семян пары удаляли, а на его место к оставшемуся семени подсаживали новое семя. В дальнейшем процедура изъятия и посадки повторялись и приурочивались последовательно к следующим фазам проростка, вырастающего из оставшегося семени: 1) колеоптиля, 2) появление каждого очередного листа. Каждое удаленное семя-приемник проращивалось и доводилось до проростка, у которого определялась биоизомерия по первому настоящему листу (у *l*-проростка лист заворачивается против часовой стрелки, у *d*-проростка – по часовой стрелке [3]). Чтобы исключить химическое и гидродинамическое взаимодействие компонентов пары,

между ними был помещен экран из оргстекла толщиной до 1 мм (рис. 1). Таким образом, взаимодействие компонентов пары осуществлялось только посредством их биоэлектрических полей, как в [1, 2]. Число повторностей каждого варианта – не менее 100 пар.

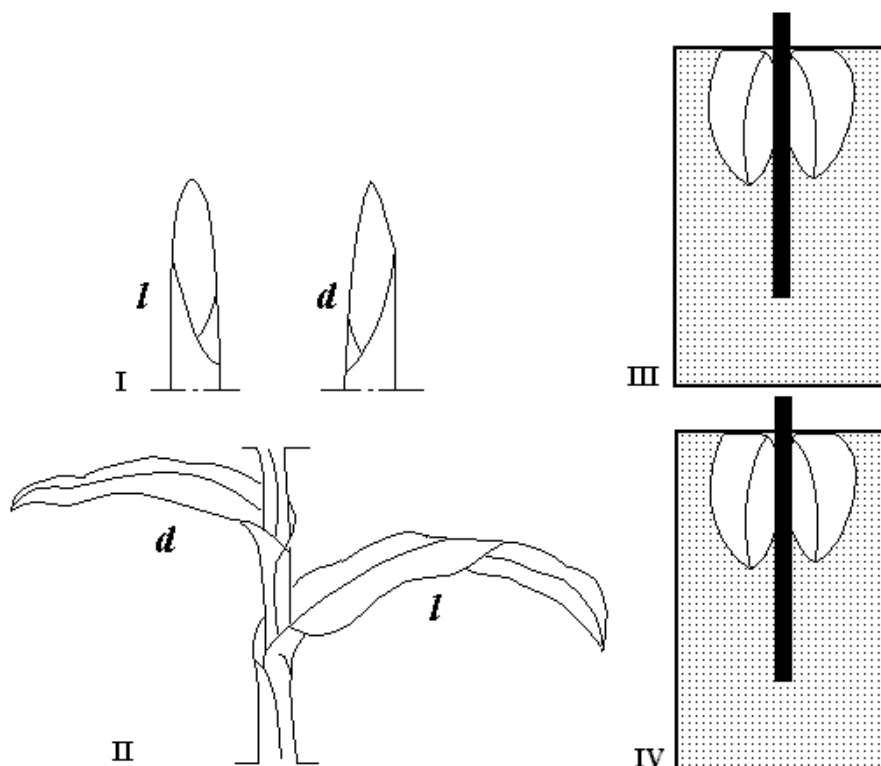


Рис. 1. Схема опыта.

I, II – левые (l) и правые (d) соответственно проростки и листья, III, IV – соответственно системы “семя-семя” и “проросток-семя”, разделенные фильтром из оргстекла.

Результаты и обсуждение. В начальный период опыта число зеркально симметричных пар (ЗСП) вплоть до появления первого листа у проростков-индукторов не превышало контроль – уровень случайного распределения пар (рис. 2). Следовательно, взаимодействие между компонентами пары практически отсутствовало. В последующем картина существенно менялась. При анализе пар “верхний очередной лист объекта-индуктора – первый лист объекта-приемника” в парах с четными листьями объекта-индуктора (2 и 4) число ЗСП находилось на уровне контроля, а с нечетными листьями (1 и 3) – число ЗСП существенно превышало контроль (рис. 2). Напомним, что у нечетных листьев знак биоизомерии такой же, как у первого листа и противоположен по сравнению с нечетными листьями. Если составлялись пары “первый лист объекта-индуктора – первый лист объекта-приемника” получено высокое значение числа ЗСП [1, 2]. Из этого следует, что эффект ЗСП у разновозрастных объектов детерминирован не биоизомерией самого молодого листа объекта-индуктора и, строго говоря, не биоизомерией конкретного листа, а биоизомерией проростка в целом, которая определяется, по данным литературы, только биоизомерией первого листа [3]. По-видимому, формирование ЗСП – это эффект преимущественно организменного уровня. Логично, что с увеличением возраста объекта-индуктора эффект усиливается, ведь усиливается и его биоэлектрическое поле [4]. При этом в начальный период онтогенеза проростка-индуктора эффект может даже отсутствовать (как в нашем случае).

Как известно, между растениями биоизомерами нарушается паритет по физиолого-биохимическим и биофизическим параметрам [3, 4]. В частности, *d* – растения кукурузы характеризуются более высокой физиологической активностью и продуктивностью по сравнению с *l* – растениями [3, 4]. Можно полагать, что между проростками-биоизомерами индуктора существует разнокачественность и по способности формировать ЗСП. Действительно, такой факт имеет место, причем лучшей способностью создавать ЗСП обладают также *d*–проростки. Коэффициент их зеркальной симметризации с проростками приемника (вычисленный как отношение числа *dl* пар к числу *dd* пар)

составил 1,00–1,68, в то время как аналогичный коэффициент для l -проростков (вычисленный как отношение числа ld пар к числу ll пар) составил 0,54–1,00 (рис. 3). Дополнительно можно отметить, что согласно этому коэффициенту интенсивность формирования ЗСП d -проростками индуктора с проростками приемника периодически меняется в зависимости от фазы индуктора, а аналогичная функция l -проростков с возрастом выравнивается с медленным линейным увеличением указанного коэффициента (рис. 3). По нашему мнению, в этом случае уже проявляется индуцирующее действие конкретных листьев объекта-индуктора, точнее их биоэлектрических полей, которые модифицируют, хотя и незначительно, действие биоэлектрического поля целого проростка. Происходит как бы наложение эффекта органного уровня на организменный. Обращает на себя внимание лучшая выраженность эффекта зеркальной симметризации, индуцированная d -проростками в фазе четных (l) листьев. Этот факт требует дальнейшего исследования и осмысливания.



Рис. 2. Динамика образования зеркально симметричных пар у разновозрастных объектов проростков в онтогенезе проростка – индуктора эффекта.

1, 2 – число зеркально симметричных пар соответственно в системах “первый лист объекта-индуктора – первый лист объекта-приемника” и “верхний лист объекта-индуктора – первый лист объекта-приемника”, K – границы стандартного отклонения зеркально симметричных пар у контроля, где отсутствует электромагнитное взаимодействие компонентов пары.

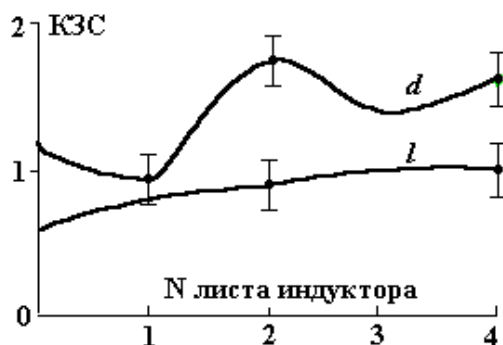


Рис. 3. Динамика коэффициента зеркальной симметризации пар с участием левых (l) и правых (d) проростков-индукторов.

Анализ эффективности симметризации был проведен и по другому критерию, в котором учитывалось число зеркально симметричных пар (знак биоизомерии у проростков пары разный) и число зеркально асимметричных пар – ЗАП (знак биоизомерии у проростков пары одинаковый). Подсчитывалось среднее количество ЗСП и ЗАП за весь период опыта, начиная 1) с колеоптиля и до четвертого листа, 2) с первого листа до четвертого листа. Такой прием позволяет в определенной степени судить об уровне организации (упорядоченности) процесса зеркальной симметризации. Если среднее число ЗСП в течение какого-то периода онтогенеза проростка-индуктора увеличивается, то уровень его организации становится более высоким. На рис. 4 видно, что с возрастом у проростков заметно увеличивается интенсивность процесса ЗСП, в особенности на конечном этапе опыта. В меньшей степени такое усиление заметно у l -проростков. При сопоставлении среднего количества ЗСП у l и d проростков-индукторов можно заметить периодический и реципрокный (противоположный) характер изменения этих параметров в онтогенезе объекта, – то есть наблюдаются противофазные ритмы образования систем из двух проростков. В отношении зеркально асимметричных

пар такая закономерность отсутствует (рис. 4). Выше мы отмечали общую (на уровне организма) системообразующую доминантность правизны. На рис. 4 мы видим частную (на уровне органов) доминантность левизны: зеркальная симметризация двух проростков усиливается с участием *l* и *d* объектов-индукторов к моменту появления у них листьев.



Рис. 4. Среднее число зеркально симметричных (*dl* и *ld*) и зеркально асимметричных (*ll* и *dd*) пар разновозрастных проростков в онтогенезе объекта-индуктора соответственно от coleoptilya до четвертого листа, от первого до четвертого листа, от второго до четвертого листа, от третьего до четвертого листа.

Таким образом, при исследовании динамики зеркальной симметризации пар разновозрастных проростков кукурузы обнаружена детерминация эффекта симметризации в основном за счет биоизомерии и биоэлектрического поля проростка-индуктора как целого организма и модуляция эффекта за счет биоизомерии и биоэлектрического поля отдельных листьев (метамеров) объекта-индуктора.

ЛИТЕРАТУРА

1. Маслоброд С.Н., Шабала С.Н., Третьяков Н.Н. Эффект зеркальной симметризации ценотической пары проростков и электромагнитное взаимодействие прорастающих семян // Доклады АН России. 1994. 334. № 3. С. 396–398.
2. Маслоброд С.Н., Шабала С.Н. и др. Оценка взаимодействия растений в группе по зеркальной симметризации пары проростков // Известия АН Молдовы. Сер. хим. и биол. наук. 1994. № 6. С. 14–18.
3. Сулима Ю.Г. Биоритмические и биосимметрические явления и признаки у сельскохозяйственных растений. Кишинев, 1970.
4. Маслоброд С.Н. Электрофизиологическая полярность растений. Кишинев, 1973.

Поступила 09.01.2001

Summary

It was studied the dynamics of the effect of mirror symmetrization (EMS) with the different aged seedlings. The EMS arises as a result of the electromagnetic interaction of a pair consisting of a seed and a seedling. The seed was planted to the seedling ion – the different phases of seedling growing (from the first to the fourth leaves). It was discovered the reverse dependence of the bioisometry (leftness and rightness) of the seedling, growing out of the pair's seed on the bioisometry of the pair's seedling, that is expressed in the EMS, that is in forming in the pair mainly left and right seedling. The EMS in creases with the age of the seedling – inductor and is better expressed with the participation of the right seedling – inductors. Bioelectrical field and bioisometry mainly of the whole seedling but not its leaves have influence on the EMS.

ИЗМЕНЕНИЕ АНТИБИОТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СТРЕПТОМИЦЕТОВ ПОД ВЛИЯНИЕМ γ - И КОМБИНИРОВАННОГО (γ - И УФ) ОБЛУЧЕНИЯ

*Институт микробиологии АН Молдовы,
ул. Академией, 1, г. Кишинев, МД-2028, Республика Молдова*

Проблема поиска новых биологически активных природных соединений остается на сегодняшний день актуальной. Большинство из этих соединений является метаболитами микроорганизмов. В связи с этим главным источником для создания новых биотехнологических процессов и продуктов можно с полным правом считать разнообразие микроорганизмов. При этом используются различные подходы, среди которых и проблема скрининга микроорганизмов на выявление потенциально полезных признаков [1].

Антибиотики микробного происхождения широко применяются в медицине, ветеринарии, а также и для защиты растений. Перспективность их использования связана со сравнительно слабой токсичностью для человека и животных по сравнению с химическими средствами защиты, специфичностью действия, способностью проникать в ткани растений и высокой активностью к возбудителям болезней. Последнее дает возможность применять антибиотики в сотых или тысячных долях процента и значительно снизить накопление остаточного количества препаратов в сельскохозяйственных продуктах и почве [2].

Наиболее вероятным источником новых антибиотических веществ остаются актиномицеты, представляющие уникальную группу прокариотов – микроорганизмов, сочетающих молекулярные, химические и физиологические особенности прокариотов с морфологическими признаками эукариотических грибов. Мицелиальная структура актиномицетов может обеспечивать возможность дифференциальной экспрессии геномов в процессе роста и в ответ на постоянно изменяющиеся условия среды обитания. Следствием сложной многоклеточной структуры актиномицетов являются их значительные адаптивные возможности, обусловленные способностью образовывать огромное разнообразие вторичных метаболитов. Учитывая, что характерным свойством многих штаммов актиномицетов, в том числе и стрептомицетов, как одного из наиболее распространенных в окружающей среде семейств актиномицетов, является генетическая нестабильность многих признаков (спорообразование, биосинтез антибиотиков, ферментов и др.), а клоны с мутантным фенотипом возникают или спонтанно или под влиянием ряда факторов, перспективность изучения особенностей изменчивости стрептомицетов, индуцируемой различными мутагенными факторами, в том числе ионизирующими излучениями, очевидна [3–6].

Как уже ранее упоминалось, актиномицеты зарекомендовали себя как наиболее продуктивный и неисчерпаемый источник антибиотиков. Самой распространенной и хорошо изученной группой актиномицетов давно считается род *Streptomyces*, представители которого образуют наибольшее количество известных в настоящее время веществ, обладающих антибактериальным, противоопухолевым, антигрибковым действием. Обнаружены культуры с противовирусными, инсектицидными и антигельминтными свойствами [7].

Успех поиска продуцентов новых антибиотиков, по мнению многих авторов, в большей степени зависит от применения новых нестандартных методов отбора культур. Применение необычных методов или их различных сочетаний позволяет выделить новые формы микроорганизмов, которые нередко оказываются и продуцентами неизвестных ранее природных антибиотиков. Так, в бактериологии известен метод получения чистой культуры цианобактерий с помощью ультрафиолетового облучения, основанный на большей устойчивости их к ультрафиолету по сравнению с сопутствующими бактериями [8]. Известно, что и различные виды актиномицетов различаются по чувствитель-

ности к ультрафиолетовому облучению [9]. Облучение ультрафиолетовым светом суспензий почвенных культур приводило к значительному уменьшению количества выделенных актиномицетов – антагонистов, среди которых редкие виды актиномицетов оказались менее активными по сравнению со стрептомицетами в отношении используемых тест-бактерий [10].

Предыдущими нашими исследованиями было установлено, что после воздействия γ -излучения и комбинированного (γ - и УФ-лучи) облучения у новых вариантов стрептомицетов количество биомассы повысилась в 2,5–4,5 раз, а количество содержащихся в ней липидов у отдельных вариантов увеличилось в 72,2–387,1% по сравнению с исходной культурой [11].

Целью исследований являлось определение антибиотических свойств вариантов стрептомицетов, полученных в результате γ - и комбинированного (γ - и УФ-лучи) облучения, по отношению к ряду тест-организмов, в том числе возбудителей инфекционных болезней пчел и фитопатогенов.

Методика эксперимента

Объектами исследований служили музейный штамм стрептомицетов *Streptomyces canosus* 71, два его варианта (варианты 6 и 11), полученные в результате воздействия γ -излучения, и 6 вариантов, полученных в результате воздействия комбинированного (γ - и УФ-лучи) облучения и отличающиеся от исходной культуры морфологическими признаками и биосинтетической активностью.

Антибиотические свойства изучаемых штаммов определяли методом агаровых блоков на агаризованных средах. Блоки с 5–7 суточными культурами стрептомицетов помещали в чашки Петри на поверхность засеянных тест-микроорганизмами питательного агара (грамположительные и грамотрицательные бактерии), картофельного агара (фитопатогенные бактерии) и сусло-агара 5 Блг (грибы и дрожжеподобные грибы рода *Candida*). Чашки Петри выдерживали в термостате при 27°C (грибы и фитопатогенные бактерии) и 37°C (бактериальные возбудители болезней пчел и дрожжеподобные грибы рода *Candida*) в течение 1–3 суток. Зоны подавления роста измеряли в миллиметрах по диаметру [12]. В качестве тест-организмов использовали следующие культуры: бактерии – *Escherichia coli*, *Bacillus subtilis*, *Proteus vulgaris*, *Staphylococcus aureus*, фитопатогенные бактерии – *Erwinia carotovora*, *Corynebacterium michiganense* и ряд бактериальных возбудителей болезней пчел, широко распространенных на пасеках Молдовы – *Bacillus alvea*, *Bacillus larvae*, *Streptococcus apis*, *Salmonella typhimurium*, грибы – возбудители микозов пчел – *Ascospaera apis*, *Aspergillus flavus*, *Aspergillus niger*, фитопатогены – *Fusarium solani*, *Penicillium expansum* и два штамма – *Fusarium sp.* и *Penicillium sp.*, выделенные от больных и клинически здоровых пчел, а также представитель рода *Candida* – *Candida albicans*.

Результаты и их обсуждение

Предыдущие исследования показали, что после γ -облучения и комбинированного (γ - и УФ-лучи) у *Streptomyces canosus* 71 появились новые варианты, отличающиеся от исходной культуры размерами, формой и цветом воздушного мицелия колоний. Был выявлен один вариант, окрашивающий среду (агаризованная среда Чапека с глюкозой) в темно-фиолетовый цвет. Определение биопродуктивности новых вариантов показало, что некоторые из них отличались по способности накапливать биомассу в количестве, превышающем исходную культуру [11]. Согласно литературным данным, значительная морфологическая и биосинтетическая гетерогенность свойственна многим актиномицетам – продуцентам хозяйственно важных биологически активных веществ, в частности, антибиотиков. Так, устойчивыми в популяции *Streptomyces avermetilus* ВКМас 1301 – продуцента авермектина являются три цветовых варианта, тогда как основной вариант (исходная культура) обладает невысоким уровнем образования этого антибиотика [13]. В наших исследованиях были использованы варианты, отличающиеся от исходной культуры наибольшим количеством биомассы, образующейся при культивировании на комплексной среде (основной источник углерода – кукурузная мука). Ранее считалось, что стрептомицеты, относящиеся к так называемой серой группе, в том числе и *Streptomyces canosus*, проявляют антимикробную активность только по отношению к грамположительным бактериям, и неактивны против грамотрицательных бактерий, грибов и дрожжей [9]. Исходная культура – *Streptomyces canosus* 71 после длительного хранения в музее характеризовалась очень низкой антибиотической активностью по отношению к ряду бактериальных тест-культур. Определение антибиотических свойств новых вариантов показало, что после воздействия на *Streptomyces canosus* 71 γ -излучения антимикробный спектр значительно расширился.

По данным табл. 1, у вариантов 6 и 11, полученных после γ -облучения в дозах 2000 и 3000 Гр соответственно, антибиотические свойства по отношению к ряду бактериальных тест-культур изменились следующим образом: метаболиты варианта 6 задерживали рост практически всех

Таблица 1. Диаметры зон подавления роста бактериальных тест-культур стрептомицетами, в мм

| Штамм стрептомицетов | Доза облучения (Гр, эрг/мм ²) | <i>Proteus vulgaris</i> | <i>Esche richiacoli</i> | <i>Bacillus subtilis</i> | <i>Staphylococcus aureus</i> | <i>Ervinia carotovora</i> | <i>Corynebacterium michiganense</i> | <i>Basillus alvea</i> | <i>Basilus larvae</i> | <i>Streptococcus apis</i> | <i>Salmonella typhimurium</i> |
|--------------------------------|---|-------------------------|-------------------------|--------------------------|------------------------------|---------------------------|-------------------------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------------|-------------------------------|
| <i>Streptomyces canosus 71</i> | Исходная культура | – | 11,0 | – | - | - | - | - | - | - | - |
| Вар.6 | 2000 | 17,0 | 16,0 | 16,0 | 24,0 | 19,0 | 18,0 | 12,0 | 12,0 | 11,0 | 13,0 |
| Вар.11 | 3000 | – | 11,0 | 11,0 | 26,0 | – | – | – | – | – | 14,5 |
| Вар.1–12 | 1000+ 1800 | – | 17,0 | 18,0 | 24,0 | – | 19,0 | 16,0 | 16,0 | 18,0 | 15,0 |
| Вар.2–11 | 800+ 1800 | 27,0 | 24,0 | 24,0 | 19,0 | – | 19,0 | 25,0 | 25,0 | 25,0 | 21,0 |
| Вар.2–13 | 800+ 1800 | 27,0 | 23,0 | 23,0 | 18,0 | – | 20,0 | 25,0 | 25,0 | 23,0 | 20,0 |
| Вар.2–17 | 1000+ 5400 | 16,0 | 17,0 | 17,0 | 13,0 | – | – | 14,0 | 14,0 | 15,0 | 18,0 |
| Вар.3–9 | 800+ 1800 | – | 21,0 | 22,0 | 25,0 | – | 23,0 | 18,0 | 24,0 | 20,0 | 18,0 |
| Вар.3–12 | 1000+ 5400 | – | 24,0 | 24,0 | 32,0 | – | 16,0 | 20,0 | 20,0 | 23,0 | 20,0 |

бактерий (грамположительные и грамотрицательные бактерии). Диаметр зон задержки роста варьировал в пределах 11,0–24,0 мм. Наибольшие зоны были отмечены у *Staphylococcus aureus* (24,0 мм), наименьшие – у *Streptococcus apis* (11,0 мм). У варианта 11 антибактериальный спектр был меньше – 4 и 10 тест-культур, а диаметр зон задержки варьировал от 11,0 до 26,0 мм, причем наибольшие зоны также были отмечены у *Staphylococcus aureus*. Вариант 6 отличался от варианта 11 и исходной культуры еще и способностью задерживать рост таких фитопатогенных бактерий как *Erwinia carotovora* и *Corynebacterium michiganense*, вызывающих заболевания овощных культур (мокрая гниль томатов, гниль клубней картофеля, бактериальный рак томатов и др., зоны 19,0 и 18,0 мм соответственно).

Новые варианты, полученные после комбинированного облучения, отличались от вариантов 6 и 11 способностью синтезировать вторичные метаболиты, задерживающие рост практически всех использованных в качестве тест-культур бактерий. Однако степень активности была различной. Так, например, варианты 1–12, полученные в результате комбинированного облучения (1000 Гр + 1800 эрг/мм²) исходной культуры *Streptomyces canosus* 71, был способен задерживать рост 8 из 10 бактериальных тестов, тогда как хранящаяся длительное время в музее культура *Streptomyces canosus* 71 была способна задерживать рост только *Escherichia coli* (зона задержки роста небольшая – 11,0 мм). Сравнивая антибиотическую активность трех вариантов, полученных после комбинированного облучения варианта 6, следует отметить, что их метаболиты более активно действовали на выбранные в качестве тест-культур грамположительные и грамотрицательные бактерии. Обращает на себя внимание следующий факт, что варианты 2–11 и 2–13, селекционированные из проанализированных более чем 800 колоний, выросших после комбинированного облучения (800 Гр + 1800 эрг/мм²) более активно воздействовали на бактерии, чем вариант 2–17 (1000 Гр + 5400 эрг/мм²) и вариант 6, рассматриваемый в данном случае как исходная культура для этих новых вариантов. Диаметр зон задержки роста таких бактерий, как *Escherichia coli*, *Bacillus subtilis*, *Proteus vulgaris* составлял 23,0–27,0 мм и 16,0–17,0 мм соответственно. Необходимо особо отметить, что у вар. 2-11 и вар. 2-13 существенным образом повысилась антибиотическая активность по отношению к таким бактериям – возбудителям болезней пчел, как *Bacillus alvea*, *Bacillus larvae*, *Streptococcus apis*, *Salmonella typhimurium*. Как видно из таблицы 1, у варианта 6 зоны задержки роста этих тестов составили 11,0–13,0 мм, а у новых вариантов эти зоны увеличивались до 20,0–25,0 мм. У вариантов 2–17, полученного при более высоких дозах облучения (1000 Гр + 5400 эрг/мм²) антибиотическая активность к этим тестам была ниже, чем у вариантов 2–11 и 2–13 и незначительно, но все же выше, чем у варианта 6.

При комбинированном облучении варианта 11 антибиотические свойства двух новых вариантов стрептомицетов 3–9 и 3–12 отличались вариабельностью. Согласно табл. 1 наиболее существенные различия в антибиотической активности были замечены у этих вариантов по отношению к *Staphylococcus aureus* (25,0 и 32,0 мм) и представителям фитопатогенных бактерий *Corynebacterium michiganense* (23,0 и 16,0 мм). По отношению к бактериальным возбудителям болезней пчел антагонизм этих вариантов также был достаточно заметным – зоны задержки роста тест-культур составляли 18,0–24,0 мм.

В табл. 2 представлены результаты определения антимикробной активности изучаемых штаммов стрептомицетов по отношению к грибным тест-культурам. Согласно литературным данным, основными продуцентами антибиотиков против возбудителей болезней растений являются широко распространенные в почве актиномицеты рода *Streptomyces*. Они составляют 46% и считаются основными антагонистами по отношению к фитопатогенным грибам родов *Aspergillus*, *Fusarium*, *Penicillium*, *Alternaria* [14–16]. Как уже упоминалось ранее, такие стрептомицеты, как *Streptomyces canosus* считались неактивными против грибов и дрожжей. Однако после γ -облучения у *Streptomyces canosus* 71 появилась способность задерживать рост ряда грибов как фитопатогенных, так и вызывающих микозы у пчел, а также дрожжеподобных грибов рода *Candida*, в частности *Candida albicans*. Диаметр зон задержки роста грибных тест-культур был небольшим и составлял 10,0–14,5 мм. Из семи новых вариантов, полученных после комбинированного облучения, только один вариант 2–17 отмечен способностью задерживать рост семи из восьми тест-культур. У других вариантов, в том числе и у варианта 11, антигрибной спектр также составлял семь тестов, но зоны задержки роста этих тестов в основном были меньше, чем у варианта 2–17: под влиянием метаболитов варианта 2–17 у *Candida albicans* зоны задержки роста составляли 14,0 мм, а у варианта 11 – 19,0 мм. Сравнивая антибиотическую активность изучаемых штаммов стрептомицетов по отношению к представителям рода *Fusarium* и *Aspergillus* можно заметить, что, например, только метаболиты вариантов 2–17 вызывали задержку роста диаметром 15,0–18,0 мм (за исключением *Fusarium sp.*, выделенного от больных пчел – 10,5 мм). Не удалось обнаружить антибиотической активности у изучаемых штаммов по отноше-

нию к представителям рода *Penicillium*: небольшие зоны задержки роста (9,0–10,5 мм) были замечены только у *Penicillium sp.*, выделенного от клинически здоровых пчел. Полученные результаты свидетельствуют о целесообразности продолжения направленного поиска продуцентов противогрибных антибиотиков среди стрептомицетов. Эта точка зрения находит подтверждение в [12]: выделенные из почв Казахстана стрептомицеты секции *Flavus* активно подавляли рост *Fusarium solani* (49 штаммов), *Botrydis cinerea* (50% изучаемых штаммов), из секции *Roseus* (25% штаммов) и из *Aureus* (35% штаммов). Сравнение активности стрептомицетов и представителей редких родов актиномицетов, в частности с *Actinomadurum* оказалось также в пользу стрептомицетов.

Таблица 2. Диаметры зон подавления роста грибных тест-культур стрептомицетами, мм

| Штамм стрептомицетов | Доза облучения (Гр, эрг/мм ²) | <i>Ascosphaera apis</i> | <i>Aspergillus flavus</i> | <i>Aspergillus niger</i> | <i>Fusarium solani</i> | <i>Fusarium sp.</i> | <i>Penicillium expansum</i> | <i>Penicillium sp.</i> | <i>Candida albicans</i> |
|--------------------------------|---|-------------------------|---------------------------|--------------------------|------------------------|---------------------|-----------------------------|------------------------|-------------------------|
| <i>Streptomyces canosus</i> 71 | Исходная культура | 12,0 | – | 10,0 | – | – | – | – | – |
| Вариант б | 2000 Гр | 12,0 | 12,0 | 14,5 | 12,0 | 12,0 | – | 10,0 | 11,5 |
| Вариант 11 | 3000 Гр | 13,0 | 14,0 | 14,0 | 12,0 | 12,0 | – | 10,0 | 19,0 |
| Вариант 1-12 | 1000+ 1800 | 13,0 | – | 12,0 | 15,0 | 15,0 | – | – | 17,0 |
| Вариант 2-11 | 800+ 1800 | 13,0 | 9,0 | 10,0 | 12,0 | 15,0 | – | 10,0 | 12,0 |
| Вариант 2-13 | 800+ 1800 | 13,0 | 12,0 | 12,0 | – | 10,0 | – | 9,0 | 16,0 |
| Вариант 2-17 | 1000+ 5400 | 12,0 | 15,0 | 17,0 | 18,0 | 10,5 | – | 10,5 | 14,0 |
| Вариант 3-9 | 800+ 1800 | 15,0 | 14,0 | 12,0 | – | 10,0 | – | – | 9,0 |
| Вариант 3-12 | 1000+ 5400 | 14,0 | 12,0 | 12,0 | – | – | – | – | 17,0 |

Общеизвестно, что работа по отбору активных штаммов, образовавшихся в процессе изменчивости актиномицетов, очень трудоемкая и требует не только опыта, но и большой осторожности в связи с опасностью внесения посторонних форм [9, 17]. Возникновение активных вариантов происходит редко. Воздействуя ультрафиолетовыми и рентгеновскими лучами на культуры актиномицетов, не образующих или слабо образующих антибиотические вещества, Кельнер [17] получал от них более активные варианты. Новые штаммы от *Actinomyces albosporeus*, *Actinomyces flaveolus* резко подавляли рост стафилококков и кишечной палочки, при этом у *Actinomyces albosporeus* только 0,003% полученных и изученных культур обладали антагонистическими свойствами; у *Actinomyces flaveolus* активные варианты встречались чаще, примерно в 0,4% случаев, а у *Actinomyces cellulosaе* из 16000 штаммов не было ни одного активного. Исследования последних 10 лет показали, что удавалось выделить из различных типов почв и ризосферы овощных культур стрептомицеты с антагонистической активностью против патогенных грибов рода *Fusarium* (*F. oxysporum*, *F. solani*, *F. sporotrichiella*) и *B. cinerea*. Хиноидные окрашенные метаболиты подавляли рост только грамположительных бактерий. Из 28 штаммов актиномицетов, выделенных из почв Румынии, 12 штаммов активно подавляли рост грамположительных (*Staphylococcus aureus*, *Bacillus subtilis*) и грамотрицательных (*Escherichia coli*, *Pseudomonas aeruginosa*) [18–20] бактерии. В процессе селекции штаммов, продуцирующих стептоварицин С, только после многократных пересевов и анализа 10 000 колоний удалось выбрать одну колонию – суперпродуцент этого антибиотика [21].

Учитывая способность актиномицетов при различных условиях и сроках хранения спонтанно образовывать морфологически измененные типы колоний, многие исследователи считают обязательным проверку на стабильность исследуемого признака [9, 22–24]. Как правило, после проверки

стабильности выявляют наиболее активные по какому-либо признаку: антибиотикообразованию, синтезу ферментов, липидов, витаминов и др. [22]. В наших исследованиях изучаемые варианты стрептомицетов, полученные после комбинированного облучения, в течении двух лет периодически пересеивали и проверяли их биосинтетическую активность (образование биомассы при культивировании на комплексной среде, содержание в биомассе липидов, в том числе фосфолипидов и стероидов), а также антибиотические свойства по отношению к ряду тест-культур. Для последующей работы отобраны варианты, характеризующиеся однородностью по морфологическим признакам и постоянством биосинтетической активности [25].

Таким образом γ -облучение стрептомицетов позволяет обнаружить варианты, способные подавлять рост бактерий и грибов – возбудителей заболеваний растений и животных. Антибиотическую активность этих штаммов можно изменить, воздействуя на них дополнительно комбинированным (γ - и УФ-лучи) облучением, в результате чего у отселекционированных штаммов отмечается увеличение антибиотической активности к расширенному спектру грамположительных и грамотрицательных бактерий. Эти же варианты отличаются строгой избирательностью по отношению к фитопатогенным грибам и возбудителям микозов пчел. Увеличение дозы облучения способствует появлению новых вариантов с повышенными антибактериальными свойствами и снижающейся способностью задерживать рост некоторых низших грибов – фитопатогенов и возбудителей болезней пчел.

ЛИТЕРАТУРА

1. Bull Alan T. Biodiversity as a source of innovation in biotechnology // Annu. Rev. Microbiol. 1992. V. 46. P. 219–252.
2. Berdy J. Recent advances in and prospects of antibiotic research // Process. Biochem. 1980. V.15. № 7. P. 28–32, 34–36.
3. Аликханян С.И., Акифьев А.П. Общая генетика М., 1985. С. 41–48.
4. Даниленко В.Н., Родионов И.И. Механизмы липогенной нестабильности стрептомицетов // Антибиотики и химиотерапия. 1988. Т. 33. № 3. С. 164–171.
5. Заворотняя С.А., Федоренко В.А., Даниленко В.Н. Генетическая нестабильность признака стрептомициноустойчивости у *Streptomyces erythreus* // Антибиотики и химиотерапия. 1990. Т. 35. № 12. С. 18–21.
6. Veselinova N.I., Gesheva R.L. Polymorphysm in *Streptomyces spectabilis* 1000 // Докл. Болг. АН. 1989. Т. 42. № 5. С. 97–100.
7. Преображенская Т.П. Поиск продуцентов антибиотиков среди актиномицетов редких родов. Алма-Ата, 1990. С. 3–4.
8. Gerloff G., Fitzgerald G., Skoog F. The isolation, purification and culture of blue-green algae // Am. J. Bot. 1950. V. 37. P. 216–218.
9. Красильников Н.А. Лучистые грибки. М., 1970. С. 241–242.
10. Галатенко О.А., Терехова Л.Т., Преображенская Т.П. Применение метода облучения почвенных образцов ультрафиолетом для выделения актиномицетов редких родов // Поиск продуцентов антибиотиков среди актиномицетов редких родов. Алма-Ата, 1990. С. 29–34.
11. Бурцева С.А. Влияние γ -облучения на рост и липидообразование *Streptomyces canosus* 71 // Электронная обработка материалов. 2000. № 2. С. 68–73.
12. Тулемисова К.А., Чормонова Н.Т. Актиномицеты – антагонисты фитопатогенных грибов // Поиск продуцентов антибиотиков среди актиномицетов редких родов. Алма-Ата, 1990. С. 83–95.
13. Дриняев В.А., Стерлина Т.С., Березкина Н.Е. и др. Авермектины: естественная изменчивость штамма – продуцента *Streptomyces avermectilis* ВКМАс130 // Биотехнология. 1993. № 11–12. С. 21–25.
14. El-Gammal A. Characterisation of an antimicrobial substance produced by *Streptomyces violaceorectus* // Zbl. Microbiol. 1987. V. 142. № 2. P. 175–178.
15. Jois H., Sarkar A., Gurusidaideh S. Antifungal macrolide from *Streptomyces* sp. // Antimicrobagents and chemother. 1986. V. 30. № 3. P. 458–464.
16. Mansor I.M., Hamdi Y.A. Studies on certain fungi and actinomycetes associated with the rhizosphere of sugar cane in Iraq // Egypt. J. Microbiol. 1984. № 1. P. 9–20.
17. Красильников Н.А. Актиномицеты – антагонисты и антибиотические вещества. М.-Л., 1950. С. 129–136.
18. Нуркеримова Р.А., Чормонова Н.Т. Влияние антибиотических веществ из культуры *Streptomyces* sp. штамм 118 на фитопатогенные грибы ризосферы сахарной свеклы // Алма-Ата, 1989. С. 35.

19. Petteral O., Jahner C., Volkmann C., Zeeck A. Metabolic products of microorganisms. 264. Exfoliamyces and related metabolites new naphthoquinone antibiotics from *Streptomyces exfolianus* // J. Antibiotics. 1993. V. 46. № 2. P. 346–349.
20. Butiac A., Dragan-Bularda M. Izolări de microorganisme producătoare de antibiotice // Stud. Univ. Babeş-Bolyai Biol. 1996. V. 41. № 1–2. P. 157–163.
21. Inoue K., Yamazaki M., Armountout R. Microorganism employed for producing streptovaricin. Shio-Etsu Bio. Inc. Shin-Etsu Chemical Co. Ltd. 766412. Заявл. 26.10.91. Опубл. 05.01.93 НКИ 435/2535.
22. Жукова Р.А., Коммунарская А.Д., Пронина М.И., Терешин И.М., Журавлева Т.Н., Шабас М.Н. Методы селекции продуцентов антибиотиков и ферментов. Л., 1978. С. 160.
23. Полупанов В.С., Дуксина В.В., Торнас М.Н. Естественная изменчивость *Act. globisporis* - продуцента лизоэнзимов при различных условиях и сроках хранения // Микроорганизмы – продуценты биол. актив. веществ. Минск, 1973. С. 143–148.
24. Даваадорж Б., Терехова Л.П., Цэцэг Б., Лайко А.В., Пунцаг Т. *Streptomyces phaeofasciens*, штамм 51 – продуцент нового антибиотика группы ауреловой кислоты // Антибиотики и химиотерапия. 1993. Т. 38. № 6. С. 11–14.
25. Бурцева С.А. Сравнительное изучение действия γ -излучения, УФ-лучей и комбинированного облучения на рост и липидообразования *Streptomyces canosus 71* // Электронная обработка материалов. 2000. № 4. С. 63–69.

Поступила 25.12.2000

Summary

The change of *Streptomyces canosus 71* and its 2 variants obtained after γ -irradiation antibiotic properties under the influence of combined (γ - and UV-rays) irradiation was studied. The new variants synthesized the secondary metabolites exerted bacteriostatic action on 10 Gram-positive and Gram-negative test microorganisms (zones of suppressed growth – 13,0–32,0 mm). Activity to such bacterial agents of bees' diseases as *Bacillus alvea*, *Bacillus larvae*, *Streptococcus apis*, *Salmonella typhimurium* was increased noticeable (zones of suppressed growth – 14,0–25,0 mm in compare with 12,0–14,5 mm for the initial cultures). The variants, obtained after γ - and combined (γ - and UV-rays) irradiation were distinguished by its strong selected action on the *Candida* genus (*C. albicans*), phytopatogenic bacteria and fungi and agents of bees' mykoses.

Б.И. Ставицкий

ПРЕЦИЗИОННОЕ ЭЛЕКТРОИСКРОВОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ИЗДЕЛИЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ

*Государственное научно-производственное предприятие
"Исток" электронной промышленности,
ул. Вокзальная, 2, г. Фрязино, 141120, Московская область*

В результате многолетних исследований, проведенных в ГНПП "Исток" (разработки новых методов изготовления особо точных деталей и научных основ технологии электроискрового прецизионного формообразования), накопленного практического опыта создания и эксплуатации экспериментальных установок были разработаны высокопроизводительные автоматизированные электроискровые станки (в том числе и обрабатывающие комплексы, оснащенные системами ЧПУ со встроенными мини- и микро-ЭВМ, а также на базе персональных компьютеров) [1–24 и др.].

Созданное в ГНПП "Исток" электроискровое оборудование можно разделить на несколько "поколений":

Первое поколение: экспериментальные электроискровые прецизионные установки для изготовления миниатюрных деталей электровакуумных приборов (сеток клистронов и приемно-усилительных ламп, катодов, замедляющих систем ЛОВ и др.) [1–4, 7–9].

Первая в мире электроискровая установка для прорезания узких пазов электродом-проволокой ВА-3 диаметром 20–30 мкм представлена на рис.1,*а*.

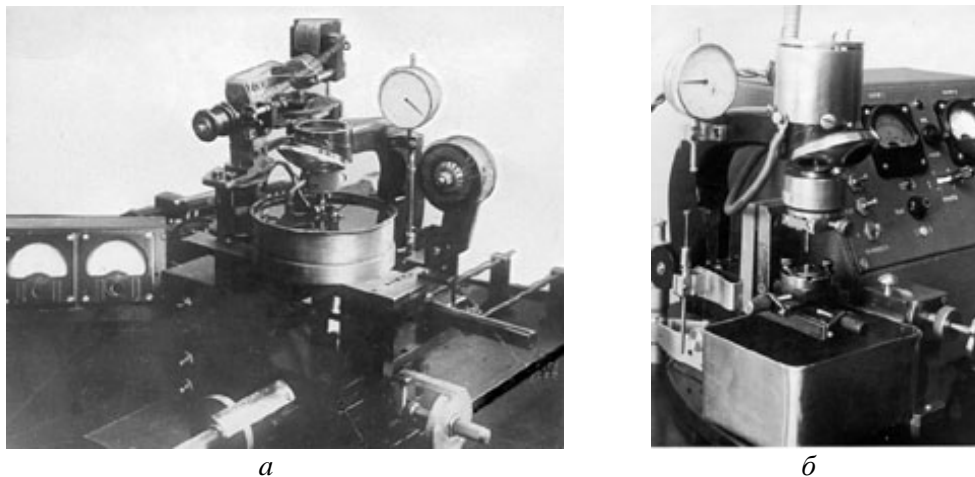


Рис. 1. Первые в мире электроискровые прецизионные установки для изготовления миниатюрных деталей электронных приборов:

а – для прорезания узких пазов (шириной 0,03–0,05 мм) и изготовления электродов-инструментов, предназначенных для электроискрового изготовления медных сеток клистронов электродом-проволокой ВА-3 диаметром 20–40 мкм (1954 г.);

б – для изготовления сеток клистронов с перемычками шириной 0,02–0,04 мм. (1957 г.).

Перемотка проволоки с катушки на приемную катушку диаметром 25 мм осуществлялось электродвигателем СД-2 со скоростью 100–150 мм/мин. Направление проволоки осуществлялось двумя V-образными полированными роликами, а ее натяжение – торможением катушки с проволокой

плоской пружиной. Вертикальное перемещение заготовки обрабатываемой детали (электрода-инструмента для изготовления сеток) осуществлялось микрометрической подачей микроскопа МБМ-1 с точностью отсчета по нониусу 0,002 мм или индикатору 0,01 мм. На приемной катушке проволока раскладывалась соответствующим механизмом.

На рис.1,б показана левая головка одной из первых полуавтоматических электроискровых спаренных установок ЭПС-3 для изготовления цельных сеток, а также одновременного изготовления отверстий различного профиля специальным электродом-инструментом. Технические характеристики установки ЭПС-3 представлены в табл. 1.

Обрабатываемая деталь закрепляется прижимами на сменной оправке, установленной на миниатюрном координатном столике. Электрод-инструмент с прорезанными на торце узкими пазами (шириной 30–50 мкм) закрепляется в призме. Осциллирующее движение ему сообщается электромагнитным вибратором (с амплитудой не более 0,01 мм). Подача электрода-инструмента производится с помощью микрометрического механизма с ценой деления 0,002 мм (аналогичного механизму первой проволочной установки). Один оборот барабана механизма соответствует 0,01 мм.

После предварительной настройки установки и закрепления обрабатываемой заготовки в оправке ванна с межэлектродной жидкостью поднимается. Пуск рабочей головки осуществляется нажатием кнопки. При этом электродвигатель СЛ-161 следящей системы включается по известной мостовой схеме. Электрод-инструмент начинает сближаться с заготовкой детали. Одновременно подается напряжение на электроды. После изготовления сетки (подачи электрода-инструмента на определенную величину) электрод-инструмент быстро отводится в исходное положение, напряжение с электродов снимается.

Таблица 1. Технические характеристики установки ЭПС-3

| | |
|---|---------------------|
| Тип генератора импульсов | RC |
| Энергия импульсов, Дж | $10^{-5} - 10^{-6}$ |
| Частота следования импульсов, имп/с | 100000–300000 |
| Максимальная потребляемая мощность, Вт | 300–500 |
| Наибольшие размеры изготавливаемой детали, мм | |
| высота | 15 |
| ширина и длина | 50 |
| Точность изготовления деталей, мм | $\pm 0,002$ |
| Наибольшая величина автоматической подачи электрода, мм | 2,4 |
| Объем ванны, л | 0,5 |
| Шероховатость обработанной поверхности R_a , мкм | 0,1–0,4 |
| Среднее количество сеток \varnothing 3–5 мм с перемычками 30–40 мкм и их шагом 0,25–0,5 мм, изготавливаемых в месяц при односменной работе, шт. | 2000–3000 |

Второе поколение: промышленные электроискровые установки для изготовления деталей электронных приборов и технологического инструмента с RC-генераторами (полуавтоматизированные, с системами автоматического регулирования межэлектродного промежутка):

установки для прорезания пазов и изготовления деталей различного профиля непрофилированным обрабатывающим электродом-проволокой (диаметром от 0,02–0,04 мм до 0,10 мм): А207.13, А207.15, А.207.20, А207.23, А207.24, А207.28, А207.33 и др.;

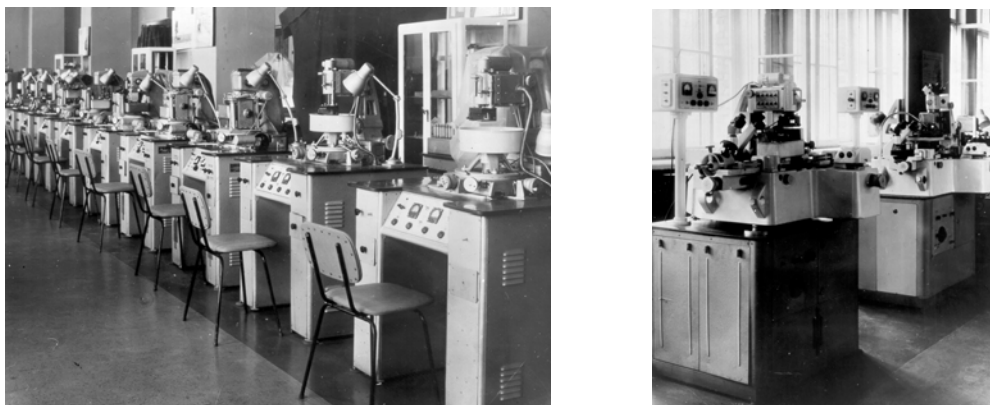
б) установки для изготовления деталей методом копирования профиля электрода-инструмента: А207.03, А207.05, А207.07, А207.08, А207.11, А207.12, А207.16, А207.23 и др.

Некоторые из этих установок второго поколения представлены на рис.2.

На рис.3 представлен общий вид опытно-производственного электроискрового участка отдела электроискровой обработки материалов НИИЭТ МЭП СССР (ныне ГНПП “Исток”), созданный в начале 60-х годов.

На переднем плане группа электроискровых установок для изготовления деталей методом копирования профиля электрода-инструмента. Справа – три установки модели А207.08, за ними координатные установки модели А207.16. Слева – двухпозиционные установки модели А207.07, затем координатные установки модели А207.12. Далее – установки для изготовления деталей электродом-проволокой: А207.23, А207.13, ЭХ 1331, ЭХ 1333, А207.27 и др. Всего на участке около 50 установок.

Третье поколение: промышленные электроискровые установки для изготовления деталей электронных приборов и технологического инструмента с *РС* генераторами и электромеханическими системами программного управления (по типу экспериментальных) или простейшими системами ЧПУ с заданием программ на перфоленте:



а

б

Рис. 2. Электроискровые координатные установки А207.16, А207.13 и другие (а) и А207.12.(б).



Рис. 3. Общий вид опытно-производственного электроискрового участка отдела электроискровой обработки материалов НИИЭТ МЭП СССР (ныне ГНПП “Исток”).

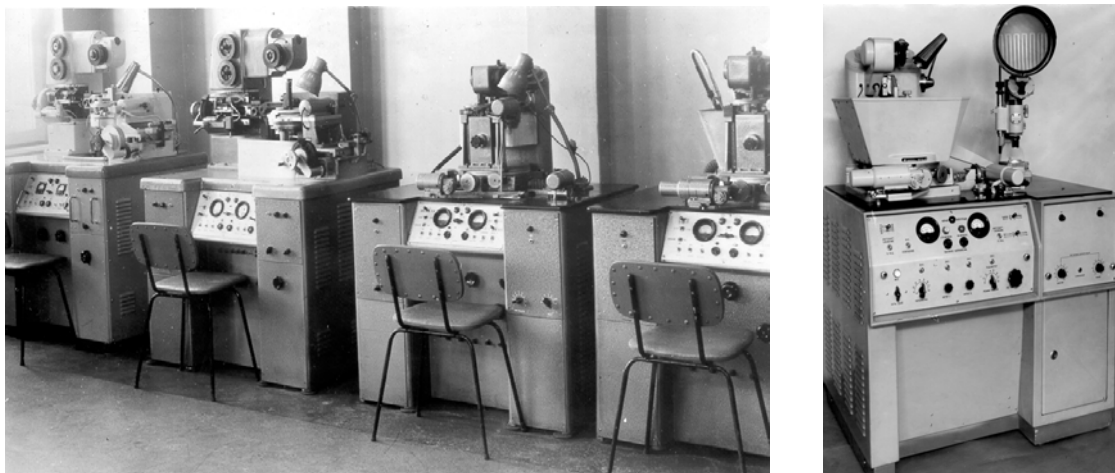
а) установки для прорезания пазов и изготовления деталей различного профиля непрофилированным обрабатывающим электродом-проволокой (диаметром от 0,02-0,04 до 0,10 мм): А207.10, А207.14, А207.18, А207.46, и др.

Четвертое поколение: промышленные электроискровые установки (полуавтоматизированные с системами автоматического регулирования межэлектродного промежутка) для изготовления деталей электронных приборов и технологического инструмента в обычной воде из водопровода с тиратронными генераторами импульсов, позволившие в 2,5–15 раз увеличить интенсивность процесса и улучшить условия труда (рис. 4):

а) установки для прорезания пазов непрофилированным обрабатывающим электродом – проволокой диаметром от 0,03 – 0,04 до 0,20 мм и изготовления деталей различного профиля (крупногабаритных анодных блоков магнетронов и амплитронов, замедляющих систем ЛОВ и ЛБВ, катодов, антенных решеток и многих других деталей ЭП): ЭХ1331, ЭХ1333, А207.13/20, А207.19, А207.26, А207.27, А207.60, А207.61, А207.62. Применение их позволило, по крайней мере, в 2,5–4,5 раза повысить скорость формообразования в диапазоне режимов, обеспечивающих шероховатость обработанной поверхности R_a в пределах 1,5–2,5 мкм (до очистки ее стеклянными шариками);

б) установки для изготовления деталей (сеток, электродов, катодов, замедляющих систем, волноводов, миниатюрных анодных блоков и других деталей СВЧ-приборов; пунсонов, матриц и

съемников вырубных штампов; фильер, сит и др.) методом копирования профиля электрода-инструмента: А207.07М, А207.26, А207.30, А207.40, применение которых позволило по крайней мере в 10–15 раз повысить скорость формообразования.



а

б

Рис. 4. Группа электроискровых установок для изготовления деталей ЭП электродом-проволокой с тиратронным генератором импульсов, обеспечивающим использование в качестве межэлектродной среды обычной воды без ее деионизации: А207.27 и ЭХ1333 (а), А 207.13/20 (б).

Пятое поколение: электроискровые обрабатывающие комплексы с тиратронными или транзисторными генераторами импульсов и системами ЧПУ на базе мини- или микро-ЭВМ для инструментального производства и изготовления деталей электронных приборов:

а) с управлением по 2 – 3 осям и использованием в качестве межэлектродной среды обычной воды из водопровода: "Электроника-77М", "Электроника-77Б", А207.78, А207.79, А207.81, А207.86, "Элизен-1" (на базе А.207.86 с микропроцессорным устройством ЮЩ2.559.008 с цветным монитором), А207.89 и А207.92;

б) с управлением по 2 – 3 осям и использованием в качестве межэлектродной среды дистиллированной воды: А207.87 и А207.90;

в) с управлением по 5 осям с использованием обычной воды из водопровода: А207.88 и А207.93;

г) с управлением по 5 осям и использованием воды с последующей ее деионизацией: "Элиур-90" (ЭХ 2214).

Появление пятого поколения электроискрового прецизионного оборудования стало возможным благодаря тому, что за годы X пятилетки (1976–1980) НПО "Исток" совместно с НПО "Феникс" были разработаны первые отечественные электроискровые обрабатывающие комплексы "Электроника" двух моделей и освоено их серийное производство.

За три года (1978–1980) выпущено около 200 комплексов двух моделей: 04ИВ-250 (А207.78, А202.01) и 04ИВ-200 (А207.81, А202.03), которые показаны на рис.5–6.

На базе комплекса "Электроника-78м" модели А207.81 создан прецизионный координатно-прошивочный комплекс 04ИП-200 модели А207.84 (рис. 7) с полем обработки до 200x100 мм. Относительные перемещения электрода-инструмента и обрабатываемой детали осуществляется по трем осям от системы ЧПУ 15ИПЧ-3-001.

В связи с необходимостью освоения в производстве новых изделий на предприятиях отрасли были созданы прецизионные электроискровые обрабатывающие комплексы "Электроника 04ИВ-140" (модель ЭХ1893) и "Электроника 04ИВ-125" (модель ЭХ1925), обеспечивающие автоматическое изготовление миниатюрных деталей электронных СВЧ приборов с точностью до 2 мкм электродом-проволокой диаметром 0,01–0,05 мм.

Вместо комплекса А207.81, А202.03, выпускавшегося серийно до 1982 года на базе универсального измерительного микроскопа УИМ-21 фирмы "Карл Цейс", был разработан прецизионный электроискровой обрабатывающий комплекс "Электроника 04ИВ-200" (модель А207.86, рис. 7) для автоматического изготовления деталей ЭП с точностью расположения элементов по шагу до ± 3 мкм с максимальным полем обработки 200 x 125 мм.

Внедрение в промышленность партии (более 700 шт.) этих комплексов позволило не только повысить точность и качество изготавливаемых деталей (в 1,6 раза), но и существенно (в 1,7 раза) уменьшить занимаемую площадь.

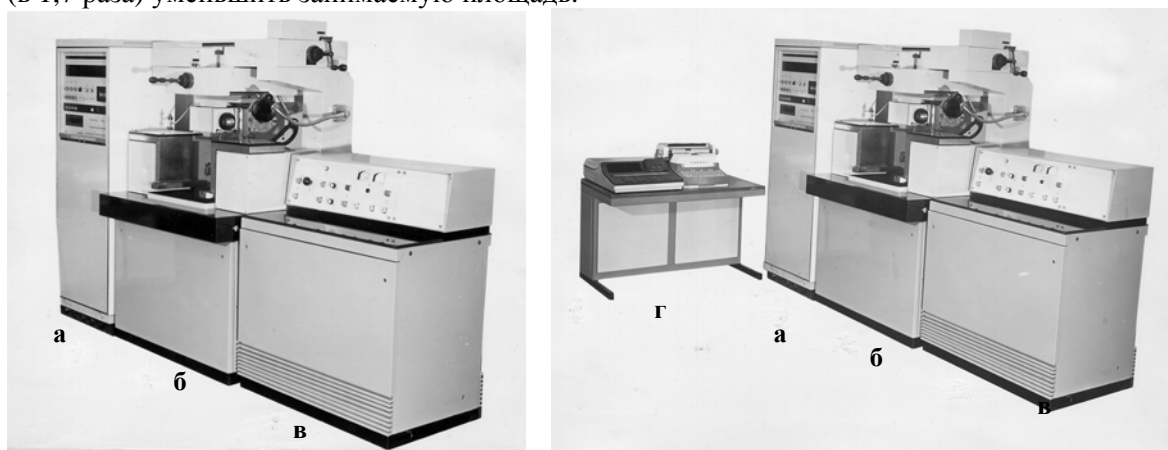


Рис. 5. Электроискровой комплекс “Электроника-78Б” модели А207.78 (слева) и модели А202.01 (справа): а – система ЧПУ 15ИПЧ-3-001 (И5М1.409.006); б – станочный модуль 04ИВ8250 (А207.78-1); в – генератор импульсный тиратронный (А207.54-50); г – система подготовки программ 15ИПГ-16-001 (А745.34).

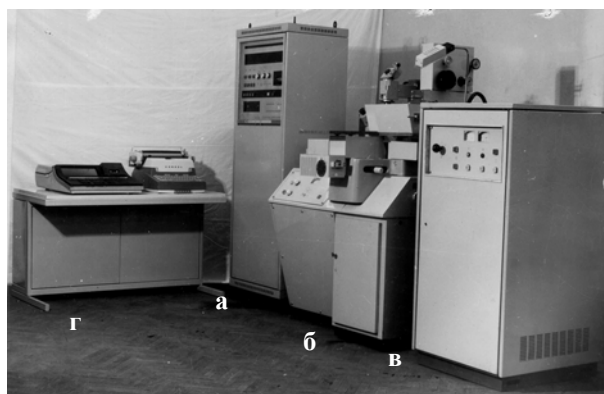
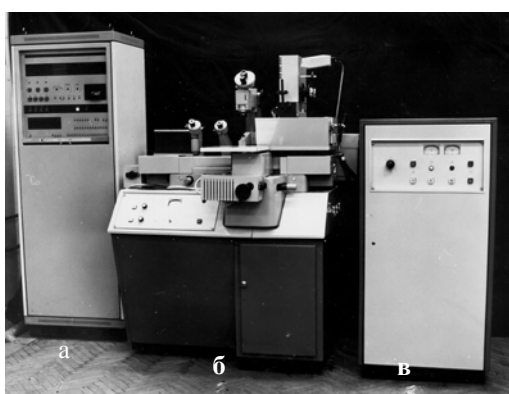


Рис. 6. Электроискровой комплекс “Электроника-78М” модели А207.81(слева) и модели А202.03 (справа): а – система ЧПУ 15ИПЧ-3-001 (И5М1.409.006); б – станочный модуль 04ИВ-200 (А208.112) на базе УИМ-21; в – генератор импульсный тиратронный (А671.57); г – система подготовки программ 15ИПГ-16-001 (А745.34).

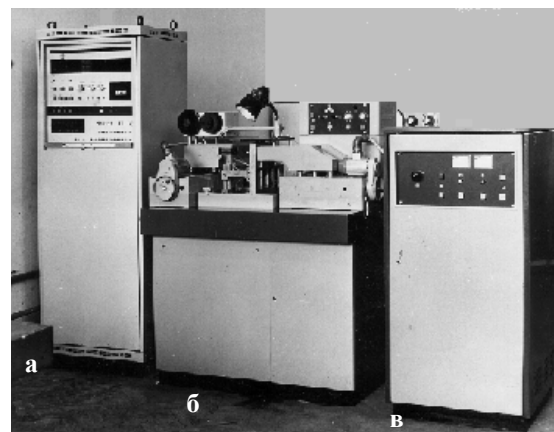
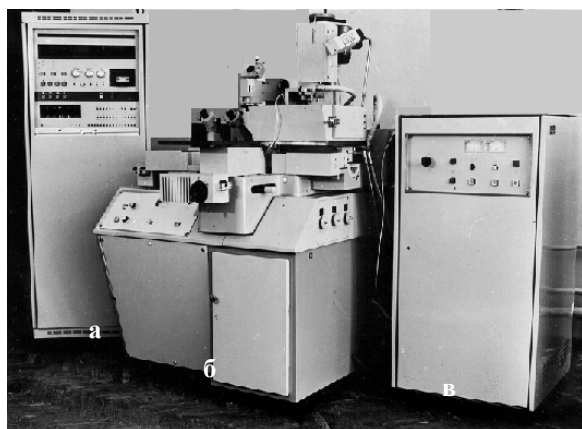


Рис. 7. Электроискровые обрабатывающие комплексы – “Электроника 04ИП-200” модели А207.84 слева (координатно-прошивочный) и справа “Электроника 04ИВ-200” модели А207.86 (для изготовления деталей электродом-проволокой): а – система ЧПУ 15ИПЧ-3-001 (И5М1.409.006); б– станочный модуль 04ИВ -200 (на базе УИМ-21); в – генератор импульсный тиратронный А671.57.

Планомерное усовершенствование комплексов, отработка конструкций отдельных узлов, повышение их жесткости, применение новых керамических материалов с малым коэффициентом линейного расширения способствовало появлению новых моделей и модификаций.

Так, например, на серийных комплексах А207.78 и А202.01 погрешности перемещения кареток координатного стола уменьшены в 2–3 раза по сравнению с первыми образцами комплексов “Электроника 78Б”, а точность комплексов модели А207.79, которые начали выпускаться с 1983 года вместо модели А207.78, увеличена еще в 1,6 раза (см. рис. 8).

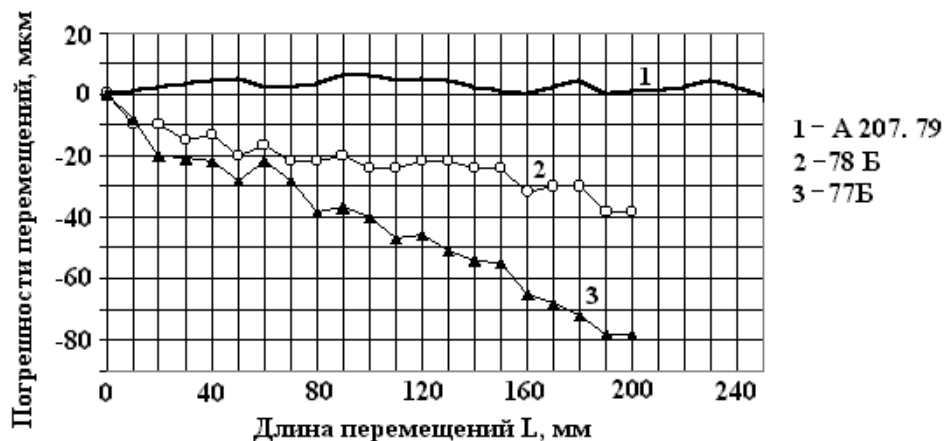


Рис. 8. Погрешности перемещений на электроискровых комплексах “Электроника” (77Б, 78Б) и А207.79 (без коррекции перемещений).

Таблица 2. Основные технические характеристики электроискровых комплексов

| Характеристики комплексов | Модели комплексов | | | | |
|--|-------------------|-----------------------|-----------------|-----------------|---------------------|
| | А207.79 | А207.90 | А207.92 | А207.93 | Элиур-90 |
| Максимальные размеры заготовок, мм | | | | | |
| длина | 430 | 100 | 250 | 250 | 600 |
| ширина | 270 | 53 | 160 | 160 | 320 |
| высота | 120 | 5 | 80 | 80 | 160 |
| Перемещение кареток, мм | | | | | |
| поперечное | 250 | 80 | 200 | 200 | 400 |
| продольное | 250 | 50 | 125 | 125 | 250 |
| Перемещение полускобы, мм: | | | | | |
| горизонтальное | – | – | – | ±20x20 | ±30x30 |
| вертикальное | – | – | – | 80 | 160 |
| Накопленная погрешность перемещения (без коррекции), мкм | 10–20 | 3 | 8 | 8 | 10 |
| Скорость формообразования при $R_a \leq 2 - 2,5$ мкм, мм ² /мин | 40–60 | – | 40–60 | 40–60 | 60 |
| СЧПУ | 15ИПЧ-3-001 | | УПУ СЭ 3/74-032 | УПУ СЭ 5/74-036 | CNC PC |
| Число осей | 2 + 1 | | 3 | 5 | 5 |
| Генератор | Тиратронный | Транзисторный | Тиратронный | | Транзисторный |
| Потребляемая мощность, кВА | 3,5 | 1,5 | 2,5 | | 4,0 |
| Диаметр электрода-проволоки, мм | 0,05–0,3 | 0,006–0,015 | 0,05–0,25 | | 0,1–0,3 |
| Межэлектродная среда | Вода питьевая | Вода дистиллированная | Вода питьевая | | Вода деионизованная |
| Занимаемая площадь, м ² | 2,5 | 1,1 | 1,2 | | 16 |

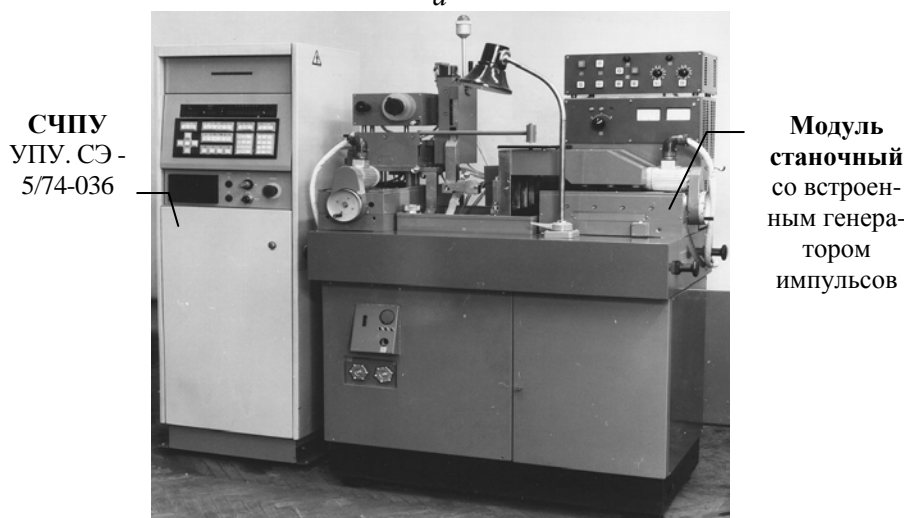
Фотографии электроискровых комплексов последних модификаций (А207.79, А207.90, А207.92, А207.93, Элиур-90), предназначенных для изготовления деталей электродом-проволокой, представлены на рис. 9–12, а их основные технические характеристики – в табл. 2.



Рис. 9. Электроискровой комплекс «Электроника-04ИВ-250» модели А207.79: а – система ЧПУ 15ИПЧ-3-001 (И5М1.409.006); б – станочный модуль 04ИВ-250; в – генератор импульсный тиристорный А671.57.



а



б

Рис. 10. Электроискровые комплексы 04ИВ-200 моделей А207.92 (а) и А207.93 (б).

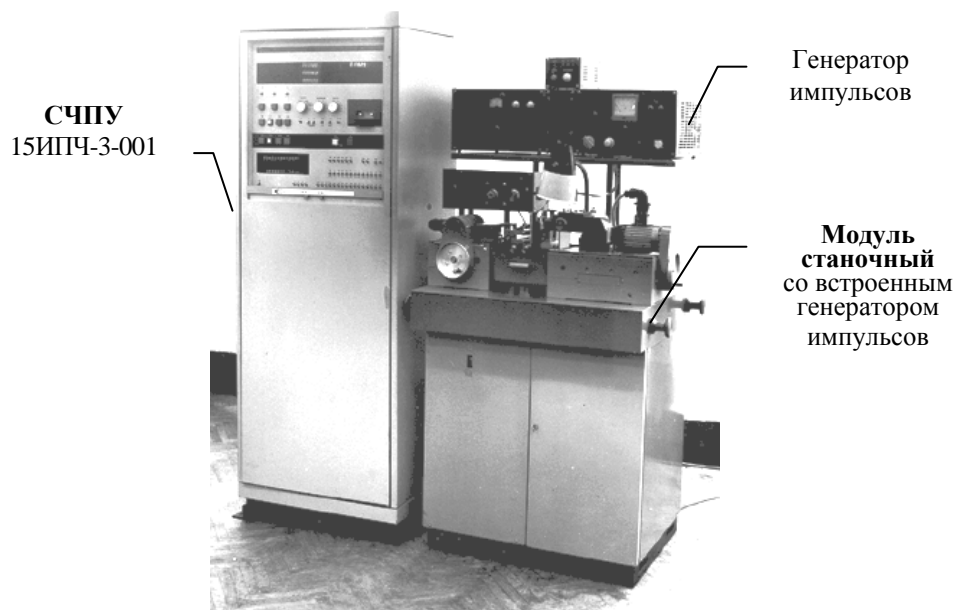


Рис. 11. Электроискровой комплексы 04ИВ-100 модели А207.90 для изготовления деталей ЭВП СВЧ электродом-проволокой $\varnothing 0,006-0,015$ мм.



Рис. 12. Электроискровой комплекс "Элиур-90" (ЭХ 2214) с автоматической заправкой электрода-проволоки и управлением по 5 осям.

Комплекс А207.90 оснащен малогабаритным транзисторным генератором, формирующим биполярные импульсы длительностью не более 0,5 мкс, обеспечивая обработку в чистой питьевой воде из водопровода без ее очистки и деионизации.

Минимальная ширина пазов прорезаемых на комплексе – 0,008–0,02 мм. Минимальный радиус в углах – 0,004–0,01 мм (в зависимости от диаметра электрода-проволоки и режимов обработки). Отклонения ширины пазов от номинала не превышает 0,002 мм, а точность их расположения по шагу – 0,003 мм.

Модель А207.90 не имеет аналогов. Она обеспечивает изготовление электродом-проволокой диаметром 6–15 мкм миниатюрных деталей СВЧ-электронных приборов субмиллиметрового диапазона длин волн, некоторые элементы деталей которых не превышают 5–10 мкм

На рис. 13 показана динамика выпуска в ГНПП "Исток" электроискровых комплексов (N), изменение их средней стоимости (C) и объема производства (Q) в долларовом эквиваленте в 1978–1991 гг.

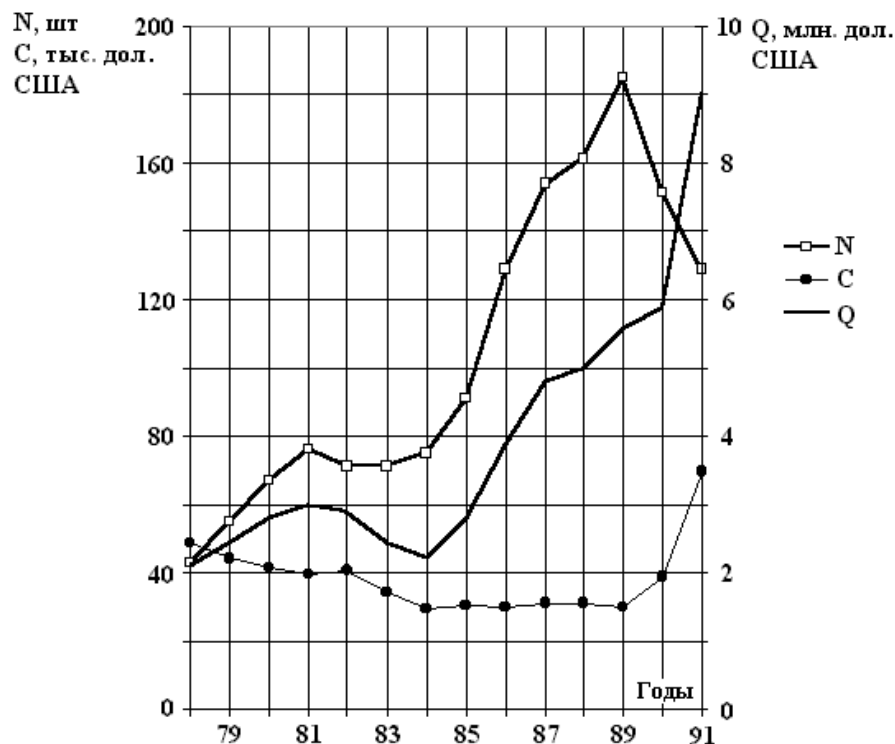


Рис. 13. Выпуск электроискровых комплексов (N), их средняя стоимость (C) и объемы производства (Q).

Электроискровой комплекс ЭХ1970 для изготовления большого количества отверстий малого диаметра (в несколько десятых долей миллиметра) в деталях из сплава меди с молибденом на глубину до 20–25 мм (пролетных каналов в блоках многолучевых электронных СВЧ приборов) показан на рис. 14.

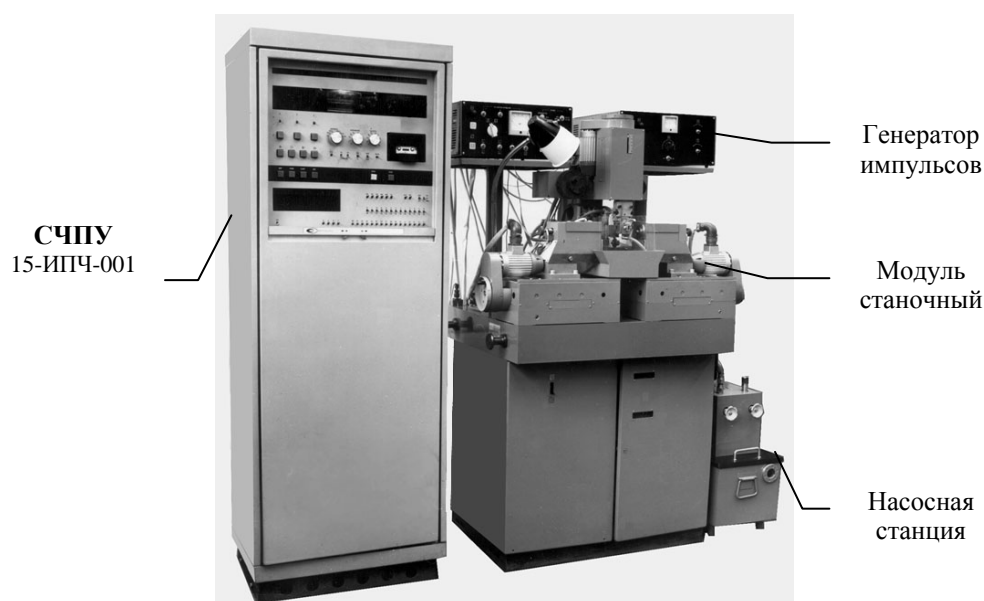


Рис. 14. Комбинированный электроискровой комплекс ЭХ1970 с системой ЧПУ 15ИПЧ-3-001 для изготовления пролетных каналов малого диаметра многолучевых электронных СВЧ приборов (МЛП).

Отверстия пролетных каналов (18–19 шт., а иногда и больше) $\varnothing 0,3\text{--}0,5$ мм должны быть густо расположены по концентрическим окружностям с перемычками между ними до 50–70 мкм (рис. 15).

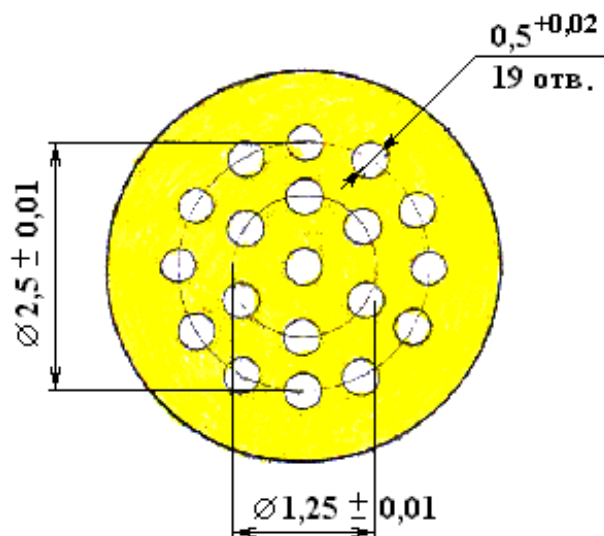


Рис. 15. Сечение пролетных каналов малого диаметра многолучевых электронных СВЧ приборов (МЛП).

Основные технические характеристики комплекса ЭХ1970 представлены в табл. 3.

Таблица 3. Основные технические характеристики комплекса ЭХ1970 для изготовления пролетных каналов малого диаметра многолучевых электронных СВЧ приборов

| | |
|---|--------------------|
| Перемещения кареток, мм продольные X1 и X2 поперечная Y вертикальная Z | 80 125 80 |
| Число шпинделей | 2 |
| Скорость вращения шпинделей, об/мин | до 5000 |
| Диаметр обрабатываемых отверстий (при $D/h =$ до 100), мм | от 0,3–0,5 до 1,0 |
| Глубина обрабатываемых отверстий, наибольшая, мм | 22 |
| Точность координатных перемещений, мкм | 6–10 |
| Скорость обработки, наименьшая, мм/мин обточки электродов прошивки отверстий $\varnothing 0,5$ мм | 1,5–2,0 1,0–1,5 |
| Диаметр электрода–проволоки для обточки электрода-инструмента, мм | 0,05–0,1 |
| Число управляемых координат | 4 |
| Система ЧПУ | 15ИПЧ-3-001 |
| Потребляемая мощность, кВА | 1,5 |
| Габариты, мм | 1700x1100x1730 |
| Объем насосной станции, л | 30 |
| Межэлектродная среда | вода |

Зарубежных аналогов комплексу ЭХ1970 нет.

Станочный модуль состоит из монолитной плиты, на которой расположены две продольные (X1 и X2) и одна поперечная каретка (Y), с расположенными на ней кареткой (Z) вертикального перемещения обрабатываемого изделия, механизмами перематки и натяга электрода-проволоки, скобой для ее направления, а также устройствами для выверки обрабатываемой детали и ее крепления.

На продольных каретках установлены механизмы вращения электрода-инструмента. Их оси строго соосны.

На комплексе вначале изготавливаются электроды-инструменты обточкой их заготовок, закрепляемых в механизмах вращения, электродом-проволокой (рис.15), а затем прошиваются отверстия в блоках МЛП (рис. 16).

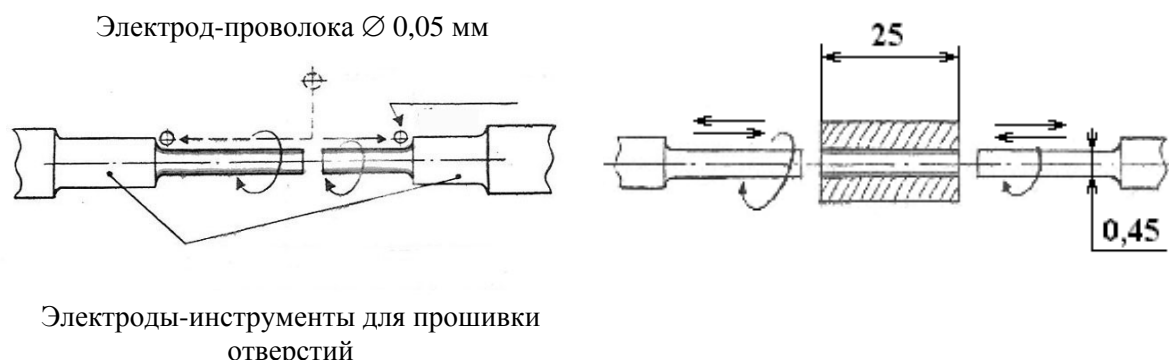


Рис. 16. Слева схема обточки электрода-инструмента для изготовления пролетных каналов малого диаметра многолучевых электронных СВЧ приборов (МЛП) на комплексе ЭХ1970, справа – схема прошивки пролетных каналов на этом же комплексе.

В качестве заготовок электродов-инструментов используются обычно стержни квадратного сечения соответствующего размера и длиной до 30–40 мм (из твердого сплава ВК3, ВК6 или вольфрамо-медной композиции) с припуском под обточку предварительно вырезанные электроискровым способом электродом-проволокой из куска твердого сплава, закрепленного в поворотном приспособлении. Вначале прорезаются пазы на длину 30–40 мм в одном направлении с шагом, равном размеру будущей заготовки электрода, а затем – в перпендикулярном направлении и получившиеся стержни квадратного сечения отрезают. Таким образом, из куска твердого сплава можно получить несколько десятков заготовок с минимально возможными отходами материала.

Показанные выше комплексы могут также использоваться и для осуществления операций копирования профиля электрода-инструмента (так называемой “прошивки”), а в случае необходимости и легирования (упрочнения) поверхностей токопроводящих материалов при дополнительном оснащении их соответствующими устройствами (приспособлениями для закрепления электродов-инструментов, базирования заготовок деталей и др.).

Примеры анодных блоков магнетронов, различного инструмента и других деталей, изготовленных на указанном оборудовании, представлены на рис. 17–20.

Новая модель пятикоординатного комплекса "Элиур-90" (рис. 12) с автоматической заправкой электрода-проволоки предназначена преимущественно для изготовления деталей разнообразных инструментов (деталей вырубных штампов и прессформ, дюз для экструзии металлов, пластмасс и других материалов; фасонных резцов, шаблонов и др.) с вертикальными и наклонными образующими профиля.

Генератор импульсов с блоками коммутаторов на мощных полевых транзисторах обеспечивает широкий диапазон режимов и скорость формообразования деталей не менее $60 \text{ мм}^2/\text{мин}$ при R_a более $2,5 \text{ мкм}$ (до очистки стеклянными шариками).

Главные преимущества базовых моделей последних модификаций, выпускавшихся серийно (А207.79, А207.92 и А207.93), по сравнению с зарубежными аналогами:

- в 5–6 раз меньший расход электрода-проволоки и электрической энергии (не более 2 м/мин и 3 кВА);
- на порядок меньшая занимаемая площадь (от 1,1 до $2,5 \text{ м}^2$);
- использование обычной воды из водопровода без ее деионизации (благодаря применению генераторов импульсов, исключающих растравливание поверхности);
- шероховатость обработанной поверхности R_a не более $1,5\text{--}2,5 \text{ мкм}$ на форсированных режимах;
- низкая стоимость (значительно меньше аналогов);
- наименьшие эксплуатационные расходы.

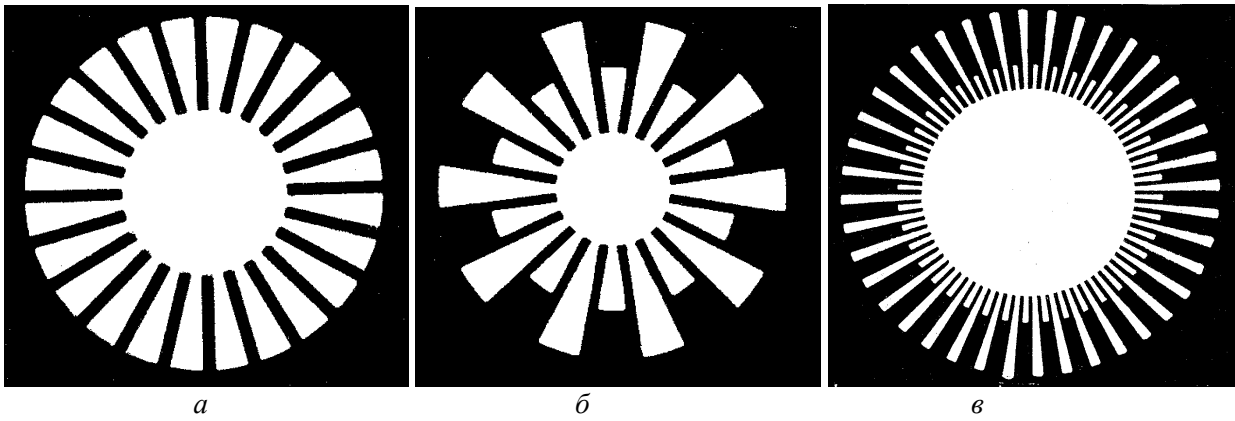


Рис. 17. Силуэты анодных блоков магнетронов лопаточного типа (а) и "восходящее солнце" (б, в): а – 24-резонаторный анодный блок: ширина ламели $0,5^{+0,02}$ мм; $d=9^{+0,02}$ мм, $D=20^{+0,02}$ мм, $h = 5$ мм; б – 20-резонаторный анодный блок: ширина ламели $0,4^{+0,02}$ мм; $d = 5,5^{+0,02}$ мм; $D_1 = 12^{+0,02}$ мм, $D_2 = 17^{+0,02}$ мм, $h = 3,6$ мм; в – 80-резонаторный анодный блок: ширина ламели $0,165^{+0,002}$ мм; $d = 8,4^{+0,01}$ мм, $D_1 = 10,7^{+0,01}$ мм, $D_2 = 15,2^{+0,01}$ мм, $h = 2,3$ мм. Периметр контура ≈ 403 мм.

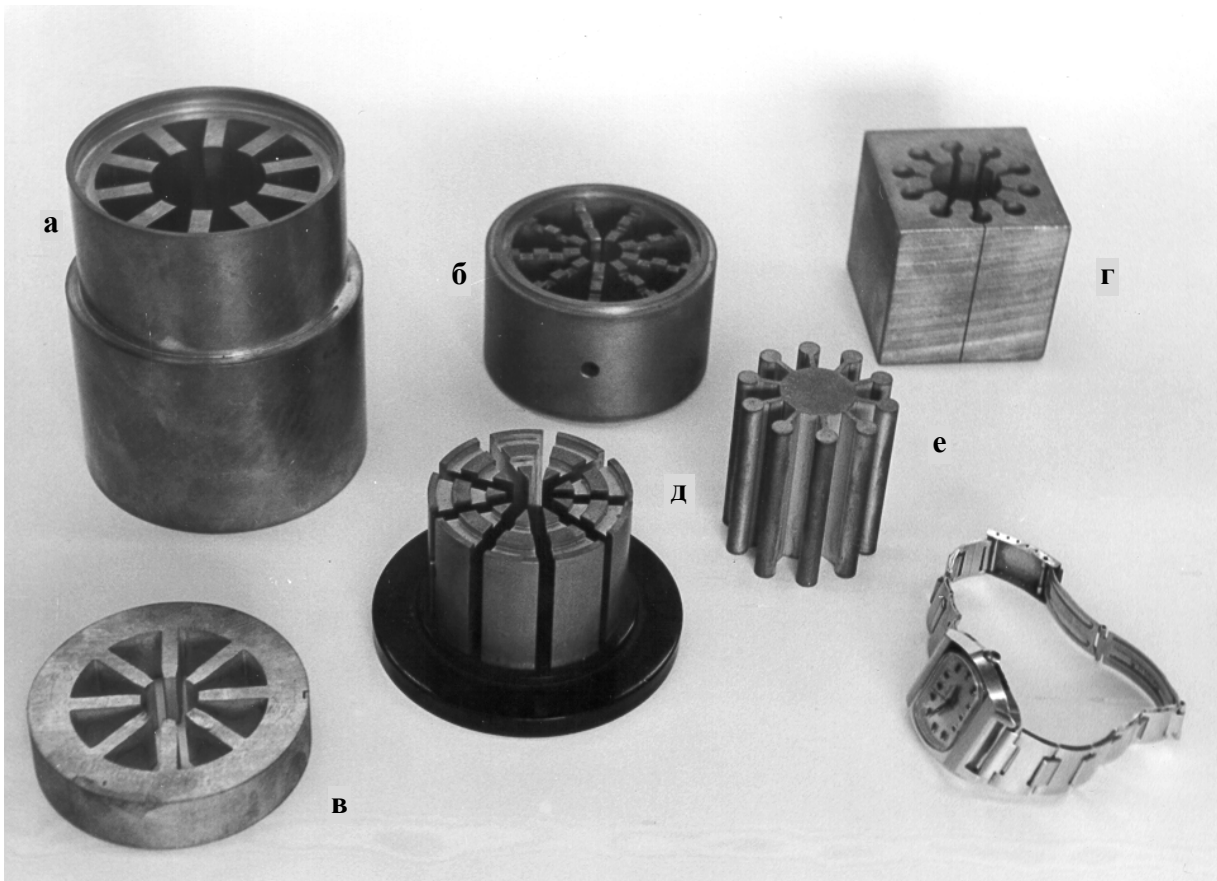


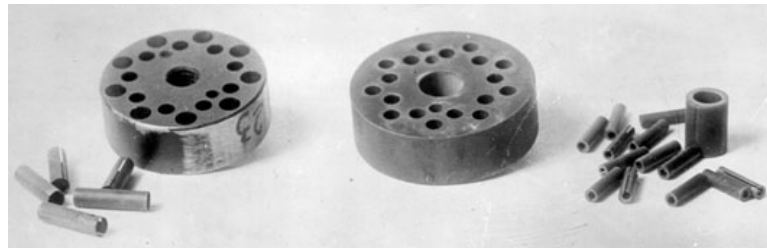
Рис. 18. Анодные блоки лопаточного типа (а–в) и "цель-отверстие" (г). Отходы металла (д, е); а – 10-резонаторный: ширина ламели – 6,4 мм, высота – 90 мм, $d = 34$ мм, $D = 68$ мм; б – 9-резонаторный: ширина ламели – 4 мм, высота – 50 мм, $d = 14$ мм, $D = 62$ мм; в – 8-ми резонаторный: ширина ламели – 4 мм, высота – 12 мм, $d = 10$ мм, $D = 40$ мм; г – 10-резонаторный: ширина щели – 2,2 мм, высота – 60 мм, $d = 8$ мм, $D = 24$ мм, межэлектродная среда – вода из водопровода, наполненная в ванну.

Электрод-инструмент – медная проволока $\varnothing 0,15-0,2$ мм.

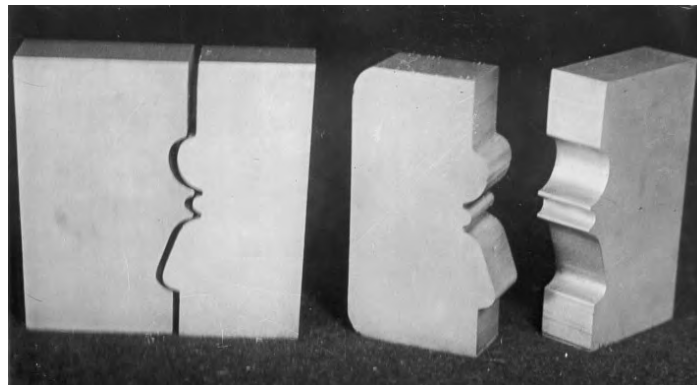
Средняя скорость формообразования $50-80$ мм²/мин при $R_a \leq 2-3$ мкм.



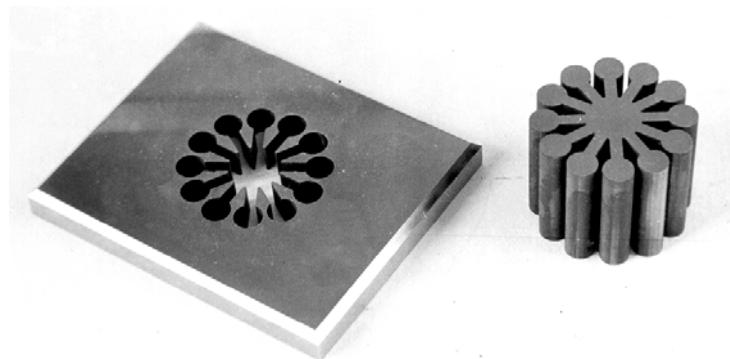
Детали из нержавеющей стали толщиной 1,0 мм, Ø80 мм.



Кондукторные вкладыши: стальной (слева) и твердосплавный (справа). Рядом – отходы. По 20 отверстий $\varnothing (1,5-3)^{+0,002}$ мм. Точность расположения отверстий по углу $\pm 5'$. Изготовлено на электроискровой установке А207.23 электродом-проволокой.

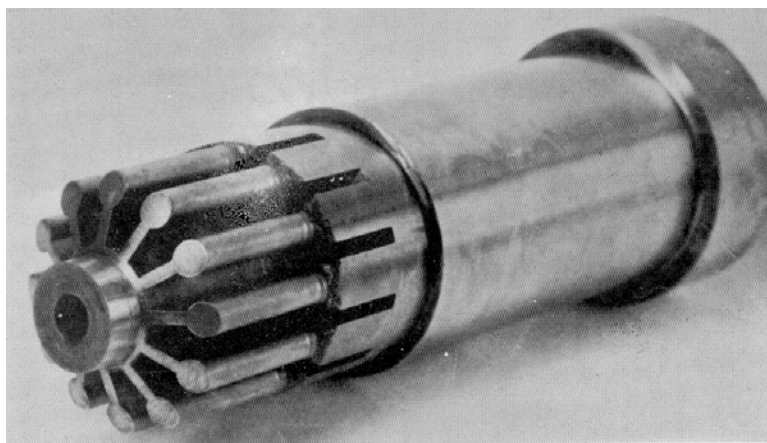


Гибочный штамп. Толщина 10 мм.



*Матрица ($h = 5$ мм, 12 отверстий $\varnothing 6$ мм, пазы 2 мм) и пуансон ($h = 30$ мм).
Материал – сталь X12М.*

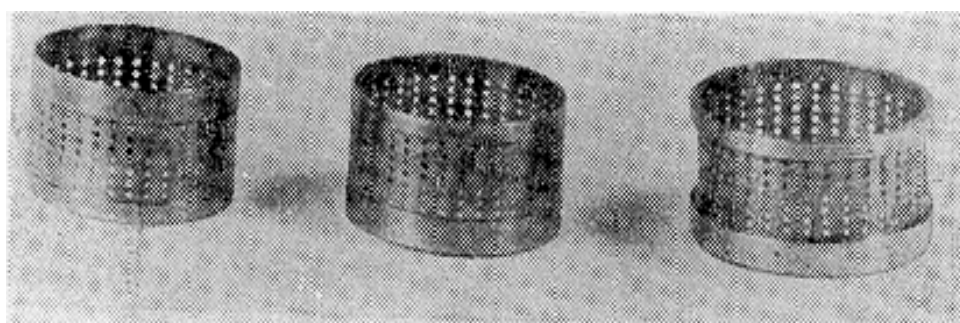
*Рис. 19. Образцы деталей, изготовленных электродом-проволокой.
Шероховатость обработанной поверхности $R_a = 0,08-1,6$ мкм.*



Пуансон для холодного выдавливания медных анодных блоков магнетронов
 $\varnothing \approx 50$ мм, $L = 120$ мм. Материал сталь ХВГ.



Сложнопрофильный стальной пуансон $\varnothing 60$ мм.



Элементы фильтра $\varnothing 6$ мм из трех деталей (по 224 отв. $0,2 \times 0,2$ мм).



Силуэты отверстий фильтр для получения искусственных волокон.
 Ширина пазов $0,07$ мм.

Рис. 20. Образцы деталей, изготовленных методами последовательного копирования профиля электрода-инструмента. Шероховатость обработанной поверхности $R_a = 0,08-1,6$ мкм.

Применение электроискровых обрабатывающих комплексов пятого поколения (“Электроника”, А207.78, А207.79 А207.81, А207.86, А207.92 и А207.93 и др.) при изготовлении инструмента (например, вырубных штампов с периметром 0,5 м) вместо традиционного механического способа обеспечивает полную автоматизацию процесса изготовления деталей, исключает применение ручного труда, в 5 раз уменьшает длительность цикла обработки, в 20 раз уменьшает занятость рабочего и в 23 раза сокращает объем механических работ.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Ставицкий Б.И., Голант М.Б., Шевелев Ю.А.* Авторское свидетельство № 105478 с приоритетом от 26 января 1955 г.
2. *Ставицкий Б.И.* Электроискровое изготовление прецизионных деталей (опыт НИИ МРТП) // Стенограмма сообщения на семинаре по теоретическим основам и опыту применения новых методов обработки металлов. Институт машиноведения АН СССР, 12–13 февраля 1957 г.
3. *Ставицкий Б.И.* Электроискровое изготовление прецизионных деталей электровакуумных приборов // Труды НИИ МРТП СССР. 1957. №11(47). С. 67–88.
4. *Ставицкий Б.И.* Исследование возможности применения электроискровой обработки для изготовления прецизионных деталей электровакуумных приборов. Кандидатская диссертация, ГС НИИ ГК СМ СССР по радиоэлектронике, г. Фрязино, 1958.
5. *Гуларян К.К.* Электроискровые координатные прецизионные установки с программным управлением // Практика применения электроискровой обработки металлов. Сб. № 2, МДНТП им. Ф.Э. Дзержинского. М., 1959. С. 1–18.
6. *Кравченко В.Л.* Электроискровые прецизионные установки. // Практика применения электроискровой обработки металлов. Сб. № 3, МДНТП им. Ф.Э. Дзержинского. М., 1959. С. 1–24.
7. *Ставицкий Б.И., Холоднов Е.В., Гуларян К.К.* Электроискровая прецизионная обработка токопроводящих материалов. ЦИТЭИН, тема 9, № М-60-127/4. М., 1960.
8. *Ставицкий Б.И.* Электроискровое изготовление прецизионных деталей электровакуумных приборов // Электроискровая обработка металлов. Вып. 2, Изд. АН СССР. 1960. С. 67–113.
9. *Ставицкий Б.И.* Электроискровые прецизионные установки // Техническая информация, ГКЭТ СССР, 1963.
10. *Кравченко В.Л.* Электроискровая прецизионная координатная установка с импульсным генератором // Электроника СВЧ. Вып. 7. 1964. С. 27–30.
11. *Ставицкий Б.И.* Некоторые виды оборудования для прецизионной электроискровой обработки металлов // Электронная обработка материалов, 1966. №1. С. 11–27.
12. *Stavitsky B. I.* Equipment for precision electrosparkmachining of metals. // Applied electrical phenomena, Consultants bureau 1966. №1. Translated from *Electronnaya obrabotka materialov*. №. 1. P.11 – 27, January – February.
13. *Ставицкий Б.И.* Электроискровое прецизионное оборудование. // Машиностроитель. 1967. № 1. С. 10–12.
14. *Дмитров Д.К.* Полуавтомат для электроискрового разрезания тонкой металлической трубки // Электронная обработка материалов. 1968. № 1. С.81–87.
15. *Ставицкий Б.И.* Современный уровень и перспективы развития электроискровой прецизионной обработки материалов // Электронная обработка материалов. 1967. № 5. С. 20–35.
16. *Дмитров Д.К., Жуков Г.А., Кацман В.А. и др.* Прецизионная координатно-прошивочная электроискровая установка с тиратронным генератором импульсов (типа А207.40) // Электронная обработка материалов. 1970. № 2. С. 90–92.
17. *Ставицкий Б.И., Гуларян К.К., Изюмин А.П.* Новая электроискровая установка // Советский экспорт. 1970. №4/67.
18. *Кравченко В.Л.* Электроискровое оборудование с тиратронным генератором импульсов // Электронная техника. Серия 7. Технология и организация производства. Вып.1/49. 1972. С. 27–32.
19. *Ставицкий Б.И., Кравченко В.Л.* Новые электроискровые прецизионные машины // Машины и оборудование из СССР. 1974. №4/35. С.17–19.
20. *Кравченко В.Л.* Прецизионные электроискровые проволочно-вырезные установки с тиратронным генератором импульсов // Электронная обработка материалов. 1975. № 1. С. 76–79.
21. *Ставицкий Б.И., Кравченко В.Л.* Высокопроизводительный электроискровой станок модели А207.61 // Электронная обработка материалов. 1976. № 1. С. 80–83.

22. Ставицкий Б.И., Кузнецов Л.Н., Рыбачук В.М. Электроискровые вырезные станки 04ИВ-200 // Электронная обработка материалов. 1986. № 4. С. 75–79.
23. Ставицкий Б.И., Гуларян К.К., Жуков Г.А. и др. Пятикоординатный электроискровой вырезной станок // Электронная обработка материалов. 1989. № 4. С. 78–81.
24. Ставицкий Б.И. Электроискровая обработка материалов – способ Лазаренко на рубеже столетий и третьего тысячелетия // Электронная обработка материалов. 2000. № 5. С. 25–40.

Поступила 19.01.2001

Summary

The totals of an almost 50-year's development of a high-tension precision machine industry in the State Scientifically industrial Plant "Source" of electronic industry (former State Allied Scientifically Research institute of State Committee of ministerial Council USSR on a radioelectronics, Scientifically Research institute of an electron Technology of the Ministry of electronic industry USSR) are brought. As a result of long-term researches (development of new methods of manufacture it is apart of precise details and scientific bases of technique high-tension precision forming, of accumulated practical experience of creation and maintenance of experimental installations the high-performance automated high-tension machine tools including treating complexes equipped with systems of a PNC with built-in mini- and the micro-computer designed and also on the basis of personal computers, the analogies with which abroad have appeared only after 10-15 years. Some of them tills now have no analogs.

ИЗ ОПЫТА РАБОТЫ

С.В. Бордусов

ДИАГНОСТИКА УДАЛЕНИЯ ФОТОРЕЗИСТА С ПОВЕРХНОСТИ ПОДЛОЖЕК ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ ПЛАЗМОЙ СВЧ-РАЗРЯДА В КИСЛОРОДЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОПТИЧЕСКОЙ СПЕКТРОСКОПИИ ПРОЦЕССА

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
ул. П. Бровки, 6, г. Минск, 220027, Республика Беларусь*

Введение

Обработка материалов и изделий электронной техники с использованием плазмы СВЧ-разряда получает в последнее время все более широкое распространение.

Важной задачей, которая при этом должна решаться, является обеспечение оперативного контроля за протеканием плазменных процессов с целью сокращения времени контакта обрабатываемой поверхности с плазменными частицами при условии полного завершения необходимых плазмохимических реакций.

Одним из известных методов контроля за протеканием процессов плазмохимического травления материалов [1], позволяющим получать достоверную оперативную информацию о характере протекания гетерогенных и гомогенных газоплазменных реакций, является эмиссионно-спектральный метод.

Данная работа посвящена спектральному исследованию процессов деструкции фоторезистивных покрытий в кислородной плазме СВЧ-разряда, формируемой в разрядных системах больших объемов.

Методика эксперимента и результаты

Исследования проводились с использованием СВЧ-плазмотрона резонаторного типа, собранного на базе согнутого в кольцо прямоугольного волновода, имеющего на внутренней поверхности отверстия для поступления СВЧ-энергии в резонирующую область.

По оси волновода располагалась кварцевая реакционно-разрядная камера (реактор), в которой в условиях вакуума возбуждался газовый разряд и проводилась плазменная обработка. Подача плазмообразующего газа и загрузка подложек осуществлялись через съемную вакуумплотную крышку, закрывающую реактор с одного торца. Вакуумирование и откачка продуктов плазменных реакций проводилась через вакуумплотное фланцевое соединение, закрывающее противоположный торец реактора.

Фотоэлектрическая регистрация спектра в интервале длин волн $\lambda=360-900$ нм осуществлялась с помощью монохроматора ЗМР-3, у которого фотоприемником служил ФЭУ-79.

В качестве плазмообразующей среды использовался технически чистый кислород.

Исследования проводились с кремниевыми подложками $\varnothing 100$ мм с нанесенными на их поверхность фоторезистами ФП-РН-7, ФП-383, AZ-1350J, прошедшими процесс стандартной обработки.

Спектральная диагностика плазменных процессов показала, что контроль за удалением фоторезиста можно проводить как по изменению интенсивности полосы СО ($\lambda=519,82$ нм), так и по линиям ОI ($\lambda=777,7$ нм; $\lambda=844,6$ нм) [2].

Однако для процессов СВЧ-плазмохимической обработки при регистрации спектров излучения

были получены результаты, отличающиеся от данных плазмохимического удаления фоторезиста в кислородной плазме ВЧ-разряда.

На рис. 1 представлены относительные интенсивности свечения полосы CO ($\lambda=519,82$ нм) в зависимости от количества обрабатываемых кремниевых подложек с фоторезистом, полученные экспериментально на ВЧ-разрядной установке 08 ПХО 100Т-001 – кривая 1; рассчитанные по данным работы [3] – кривая 2; полученные экспериментально на исследуемом плазмотроне – кривая 3.

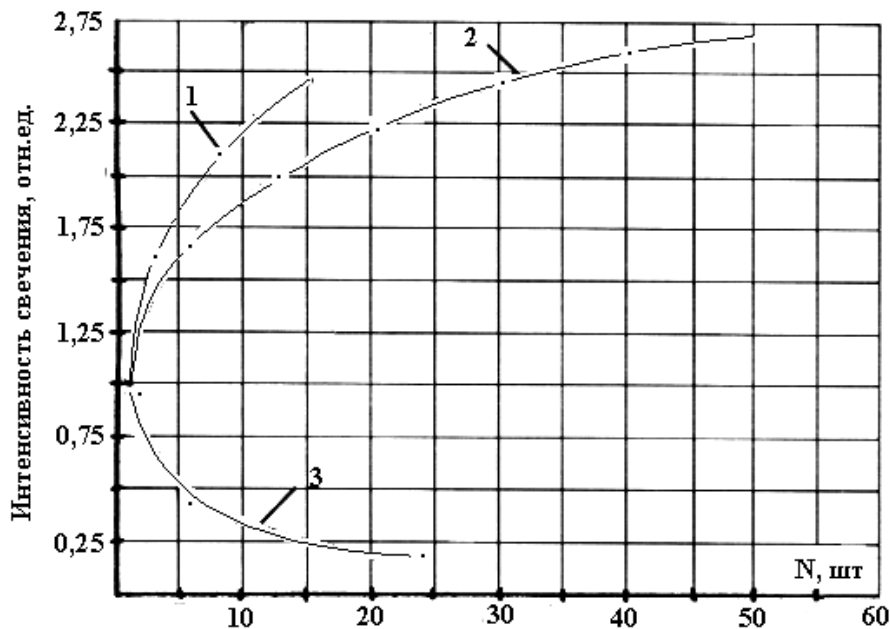


Рис. 1. Зависимость интенсивности свечения CO ($\lambda=519,82$ нм) от количества подложек в реакторе.

На рис. 2 представлен характер изменения интенсивности свечения линии OI ($\lambda=844,6$ нм) в процессе СВЧ-плазмохимического удаления фоторезиста при разном количестве одновременно обрабатываемых подложек. Для одной подложки – кривая 1, для трех подложек – кривая 2, для пяти подложек – кривая 3.

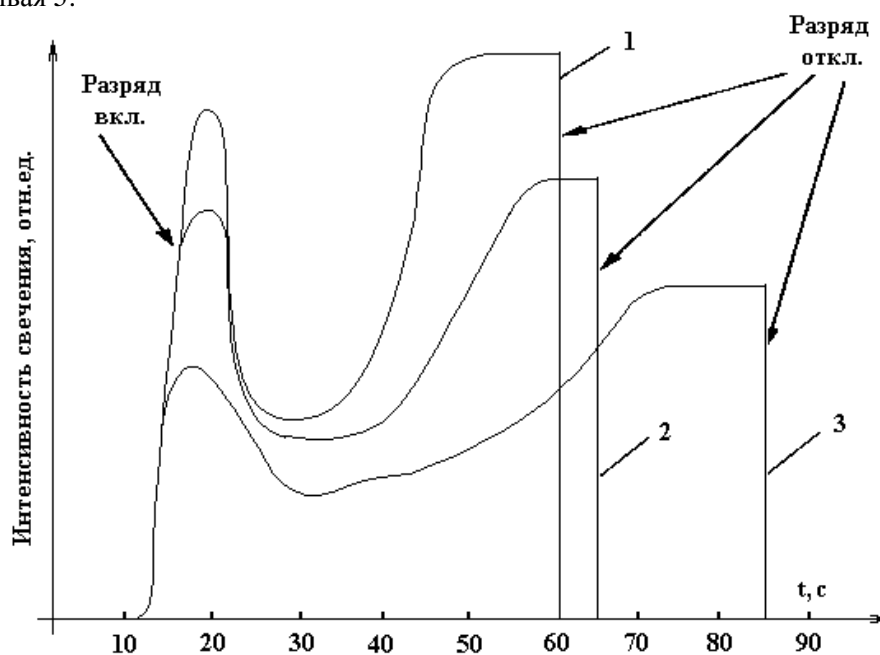


Рис. 2. Характер изменения интенсивности свечения линии OI ($\lambda=844,6$ нм) в процессе удаления фоторезиста с различного количества подложек.

Как видно из приведенных зависимостей, с увеличением количества одновременно обрабатываемых в плазме СВЧ-разряда кремниевых подложек наблюдается снижение интенсивности регистрируемых оптических сигналов не только в процессе плазменной деструкции фоторезиста, но и после полного удаления органического материала из объема реакционно-разрядной камеры. При этом установлено, что характер изменения относительных скоростей удаления фоторезиста в кислородной плазме СВЧ- и ВЧ-разряда в зависимости от числа кремниевых подложек идентичен, что свидетельствует об одинаковом механизме процессов деструкции органических соединений, состоящем в разложении сложных молекулярных соединений в процессе взаимодействия с активированным кислородом на H_2O , CO_2 , CO .

На рис. 3 представлены изменения относительных интенсивностей свечения линии ОI ($\lambda=844,6$ нм) разряда в кислороде в зависимости от числа чистых кремниевых пластин в разрядной камере установки 08 ПХО 100Т-001 (кривая 1) и исследуемом СВЧ-плазмотроне (кривая 2).

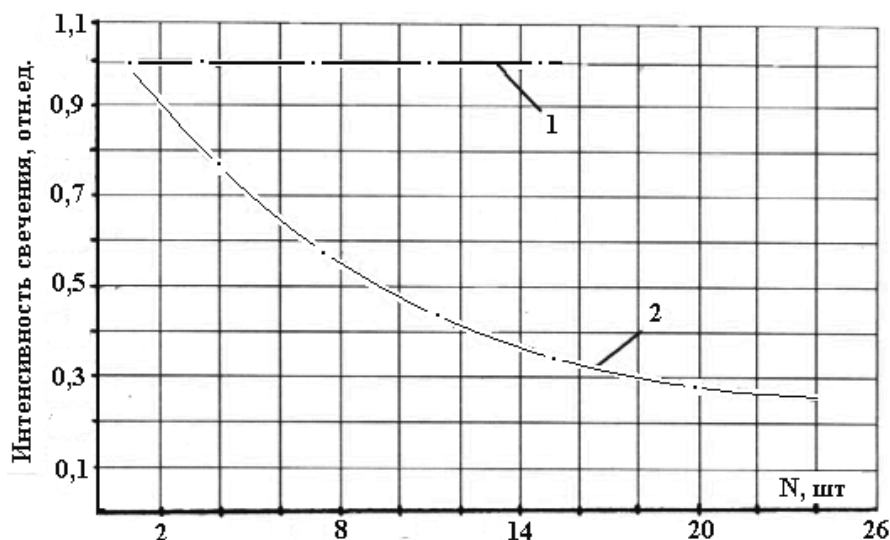


Рис. 3. Зависимость интенсивности свечения линии ОI ($\lambda=844,6$ нм) от количества одновременно обрабатываемых подложек без фоторезиста.

Анализ полученных экспериментальных результатов позволяет сделать вывод о том, что величина СВЧ-мощности, затрачиваемая на поддержание разряда, зависит от количества находящихся в зоне обработки кремниевых подложек. Этот эффект может быть объяснен частичным поглощением СВЧ-мощности материалом подложек, обладающим высоким тангенсом угла диэлектрических потерь. В связи с установленной спецификой проявления эффекта “загрузки”, при обработке в объеме кислородной плазмы СВЧ-разряда небольших партий полупроводниковых подложек контроль за удалением фоторезиста целесообразно проводить по изменению интенсивности полосы СО ($\lambda=519,82$ нм), а в случае обработки большого количества подложек – по линиям ОI ($\lambda=777,7$ нм; $\lambda=844,6$ нм).

Качественное совпадение проявления эффекта “загрузки” для процессов удаления фоторезиста в кислородной плазме СВЧ- и ВЧ-разрядов позволяет сделать вывод об одинаковой природе процесса удаления органических покрытий в разных типах разряда, в основе которого лежат химические превращения материала пленки под действием активных плазменных частиц.

Заключение

При проведении процессов СВЧ-плазмохимического удаления фоторезистивных покрытий с поверхности кремниевых подложек интегральных схем для спектральной индикации момента окончания травления небольших партий подложек целесообразно использовать контроль за интенсивностью полосы СО ($\lambda=519,82$ нм), а в случае обработки большого количества подложек – линии ОI ($\lambda=777,7$ нм; $\lambda=844,6$ нм).

ЛИТЕРАТУРА

1. Данилин Б.С., Киреев В.Ю. Применение низкотемпературной плазмы для травления и очистки материалов. М., 1987.

2. Босьяков М.Н., Бордусов С.В., Грушецкий С.В. Спектральный контроль процесса удаления фоторезиста в объеме плазмы СВЧ-разряда // Электрон. техника. Сер.3. Микроэлектроника. 1986. Вып. 4 (234). С. 304.

3. Stafford B.B., Gorin G.J. Optical emission end-point detection for monitoring oxygen plasma photoresist stripping // Solid State Technol. 1977. Vol. 20. № 9. P. 51–55.

Поступила 16.08.2000

Summary

The experimental results of examination of the optical emission of microwave plasma discharge in oxygen, performed in order to determine the spectral lines, peculiar to the process of the plasma chemical removal of the photoresist masks, are submitted. It is determined, that due to the specific manifestation of the “loading” effect when processing the silicon substrates in the microwave plasma discharge, the control of the process of removing photoresist from small batches of substrates should be performed by controlling the intensity fluctuations of the strip CO ($\lambda=519,82$ nm), and in case of processing the large quantity of substrates – as per the line OI ($\lambda=777,7$ nm; $\lambda=844,6$ nm).

J.L. Patel, N. Saka

MICROPLASMIC CERAMIC COATING

*Microplasmic Corporation,
17 Esquire Drive, Peabody, MA, USA*

Introduction

The practice of anodizing, or controlled oxidation, of aluminum and aluminum alloys is more than seven decades old. The primary intent of anodizing aluminum and alloy parts is to protect the highly reactive surface against corrosion in aqueous environments, such as humid air and sea water. Because the anodic coating can be produced in a variety of colors, painted anodized parts are used in architectural applications. Furthermore, because the anodization process produces a hard ceramic coating, many times harder than that of the substrate from which it is formed, anodic coatings are also used to protect aluminum parts from abrasion, especially sand abrasion.

Traditional Anodizing

Traditional anodizing is an electrochemical oxidation process. The part to be anodized is connected to the positive terminal of a Direct Current (DC) power source and a nonreactive metal, such as stainless steel, is connected to the negative terminal. The aluminum part, or the anode, and the stainless steel cathode are immersed in an electrolytic bath and a DC voltage is applied across them. The potential difference is of the order of 20 -100 V and the current densities are 1–10 A/dm².

The electrolytic baths comprise aqueous solutions of chromic acid, orthophosphoric acid, sulfuric acid, oxalic acid, or combinations thereof. Because the electrolytic baths have appreciable resistivity and because the anodization process itself is exothermic the temperature of the electrolytic bath increases greatly during anodizing.

Since the anodizing process is quite sensitive to temperature, the bath temperature is controlled rather closely by heat exchanger or refrigeration equipment. Today's advanced anodizing technologies include several proprietary hard anodizing processes that employ a wide range of electrolyte compositions, operating conditions and a limited aluminum alloy compositions.

The type and thickness of coating obtained greatly depends on the composition of the electrolytic bath, operating conditions and alloy compositions. The military specification MIL-A-8625F, for example, alloys for non architectural applications.

Despite the many decades of experience and the expensive equipment employed by the traditional anodizing plants, the acid bath based DC anodizing process has severe limitations.

- By the very nature of the low voltage DC power employed, the anodic coating is quite porous. Often the volume percent of pores is as much as 50%.

- Because of the low current densities employed, it takes many hours to produce a coating of a few tens of micrometers thick.

- The electrolytic baths comprise extremely low pH acidic electrolytes and thus the process does not meet many of today's environmental regulations. The expensive equipment, such as the electric power supplies and heat exchanger, makes the process capital intensive.

- The traditional process, for reasons not quite apparent, cannot be used for anodizing aluminum alloys containing high concentrations of Cu and Si.

- Thus, many aerospace and automotive parts cannot be satisfactorily anodized, if at all.

- The present process, while appropriate for a limited range of the wrought aluminum alloys, cannot be used for anodizing other reactive metals, such as Ti, Zr, Mg, etc., and intermetallic compounds and metal matrix composites. Thus, most of the promising aluminum based advanced alloys and composites cannot be protected by the traditional anodizing process.

- Above all, the hardness of even the so called hard anodic coatings is far below the hardness of alpha alumina, the principal component of the anodic coating. Accordingly, the full strength potential of the anodic layer cannot be realized by the traditional process.

- Indeed, the other potentially beneficial properties of aluminum oxide, such as the high thermal and electrical resistivities and the high dielectric breakdown strength are not even addressed.

This state of affairs is primarily due to the porosity of the coating produced by the traditional acid based electrolytic processes at low power levels, and to certain extent the poor bonding between the aluminum alloy substrate and the anodic layer.

The Microplasmic Process

In recent years, the Microplasmic Corporation, a start up R&D company of Peabody, MA, USA has developed a unique anodizing technology, called the Microplasmic Process for all types of aluminum alloys. It is an electrochemical micro arc oxidation process for which a US patent is pending. A controlled high voltage AC power is applied to the aluminum part submerged in an electrolytic bath of proprietary composition. Due to the high voltage and high current, intense plasma is created by micro arcing at the specimen surface and this plasma in turn oxidizes the surface of the aluminum specimen. Thus the process is called Microplasmic Process. The oxide film is produced by subsurface oxidation and considerably thicker coatings can be produced.

Much as the traditional process, the Microplasmic process is an electrochemical process, but there ends the similarity. The Microplasmic process is radically different from the traditional anodizing processes in many respects. The distinguishing features of the process may be summarized as follows.

- The process employs alkaline electrolytes whose composition is extremely critical to the coating rate and the properties of the anodic film that is formed. The pH of the electrolyte is in the range 8–12 and is thus environmentally sound.

- The process employs Alternating Currents at high voltage and high current. Because of the high voltage, a microplasma surrounds the electrodes and the oxygen ions produced in the plasma diffuse through the anodic film into the aluminum substrate to react and form more anodic film.

- The high voltage and high current allow the production of anodic films of the same thickness as that of the traditional process in a fraction of the time.

- Because the voltages are higher than the breakdown voltage of the film formed, open channels are not necessary for sustaining the process and hence dense thick layers of nonporous film can be readily formed.

- Because the process employs AC power, the productivity is increased.

- The power from an electrical utility supply can be used with proper controls to the electrochemical tank thus making the process less capital intensive. There is no need for power rectification and waveform smoothing.

- The temperature of the electrolytic bath need not be precisely maintained. Indeed, successful coatings can be obtained even if the temperature excursions are as much as 10–20°C, further simplifying the process.

- The electrolytic composition itself is quite variable for different types of coatings.

- Because of the high density of the coating, practically there is no change in the dimension of the anodized part, and a completely finished part can be coated without major post processing finishing operations. The Microplasmic Process, however, produces an outer soft coating of about 15% that may be buffed off; the remaining inner layer, is an extremely hard ceramic layer.

- Above all, unlike with the traditional anodization process, aluminum alloy parts of any composition can be successfully anodized by the Microplasmic Process. Even more importantly, a variety of ceramic "alloy" coatings, such as Al_2O_3 , SiO_2 , Al_2O_3 , MgO , Al_2O_3 , CaO etc. can only be produced by the Microplasmic Process.

- The Microplasmic Process is also suited for a hard coating inside surface of a part i.e. cylindrical, conical or spherical hollow parts. Many coating processes in the market, like CVD, PVD, IVD, PEPVD, Sputtering, Thermal Spraying etc. are unable to coat inside surface of a long part.

Applications

Because the microplasmic process produces a thick, well bonded ceramic coating on a variety of reactive light metal alloys, it can be used for a broad range of applications. The primary application could be the replacement of heavier metallic alloys or the more expensive composite materials required by the aerospace and automotive industries by light metals (e.g., Al, Ti, Mg, and their alloys) coated by the Microplasmic Process. Other applications can be divided into the following categories: Chemical, Mechanical, Thermal, Electrical and Electronics, and combinations of these.

- Chemical: The ceramic coating can resist both aqueous and moderately high temperature and is resistant to strong acids and bases. Thus it can be used in chemical, and food processing industries.

- Mechanical: The hardness of the film is over 1300 kg/mm^2 and thus the film can be used to resist sliding, abrasive and erosive wear. In addition the friction coefficient is low and thus can be used in marginally lubricated systems.

- Thermal: The thermal conductivity of the anodic film is much less than of metals. Thus anodized parts can be used to maintain uniform distribution of temperature and resist thermal shock.

- Electrical and Electronic: The dielectric breakdown strength of the Microplasmic film is comparable to that of alpha Al_2O_3 and hence can be used as an insulating film on electrical and electronic components.

Additionally, the Microplasmic Process is also well suited for hard coating interior surfaces (such as those of hollow cylindrical and conical parts), recesses, blind holes, threaded sections, and so on.

Many coating processes in the market, such as Chemical Vapor Deposition (CVD), Physical Vapor Deposition (PVD), Plasma Enhanced Physical Vapor Deposition (PEPVD), Sputtering, Thermal Spraying, etc. are unable to coat the inside surface of a long part. Thus, where appropriate these expensive coating processes can be readily replaced by the Microplasmic Process.

Received 07.09.2000

Summary

It is an electrochemical micro arc oxidation process is described. A controlled high voltage ac power is applied to the aluminum part submerged in an electrolytic bath in a proprietary arrangement. The oxide film is produced by subsurface oxidation and considerably thicker coatings can be produced.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В АМОРФНЫХ МАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛАХ

*Институт прикладной физики,
ул. Академией, 5, г. Кишинев, МД-2028, Республика Молдова*

В существующей технологии изготовления аморфных материалов возникают большие остаточные напряжения, влияющие на магнитные свойства. Поскольку остаточные напряжения могут определять поле наведенной магнитной анизотропии, а само поле анизотропии может быть измерено методом ферромагнитного резонанса (см. подробнее [1–4]) в данной работе предпринята попытка оценить картину распределения остаточных напряжений методом ферромагнитного резонанса.

Литой аморфный микропровод с маленькой положительной магнитострикцией был получен на экспериментальной установке фирмы “АмоТес Ltd.” со скоростью вытягивания 5 м/с и использованием стеклянной трубки из пирекса. Чтобы избежать спин волновых эффектов (см. подробнее [5]) выбирался микропровод большого радиуса (больше, чем предполагаемая толщина скин-слоя). Толщина стеклянной оболочки варьировалась 2–15 мкм. Для измерения частоты ферромагнитного резонанса применялись стандартные панорамные измерители коэффициента стоячей волны по напряжению (КСВн) – типов Р2-56, Р2-57, Р2-59, Р2-61, позволяющие проводить измерения в диапазоне частот от 2,59 до 12,05 ГГц. Микропровод помещали посередине торца между первичным и вторичным волноводом (параллельно его узким стенкам) и подмагничивали вдоль оси постоянным магнитным полем H_b (которое измерялось датчиком Холла). На конце вторичного волновода был расположен поглотитель. Частота ферромагнитного резонанса определялась по положению минимума коэффициента отражения на осциллографе КСВн. Аналогично, но без подмагничивания постоянным магнитным полем, определялась в [2, 3] частота естественного ферромагнитного резонанса, которая для наших образцов – 2–3 ГГц. Было получено возрастание величины поля анизотропии от частоты ферромагнитного резонанса более чем на 30%. Поскольку толщина скин-слоя, в котором происходит поглощение энергии СВЧ-поля, уменьшается с ростом частоты, это указывает на концентрацию остаточных напряжений в поверхностном слое аморфного микропровода. Отметим, что поле анизотропии внутреннего магнитного поля образца – H_a находилось из формулы (см. подробнее в [2])

$$(\Omega / \gamma)^2 = (H_a + H_b + 4\pi M)(H_a + H_b),$$

где Ω – частота ферромагнитного резонанса, где $\gamma=2\pi \cdot 2,8$ МГц/Э – гиромагнитное отношение; H_b – поле подмагничивания; M – намагниченность насыщения (в исследуемом материале – 0,8 кЭ).

Выводы

1. При изготовлении аморфных металлов остаточные напряжения металла можно измерять методом ферромагнитного резонанса.
2. В литом аморфном микропроводе напряжения возрастают на поверхности жилы микропровода.

ЛИТЕРАТУРА

1. Баранов С.А., Бержанский В.Н., Зотов С.К., Кокос В.Л., Ларин В.С., Торкунов А.В. // Ферромагнитный резонанс в аморфных магнитных проводах // ФММ. 1989. Т. 67. В.1. С. 73–78.
2. Баранов С.А., Зотов С.К., Ларин В.С., Торкунов А.В. Особенности естественного ферромагнитного резонанса в аморфном микропроводе // ФММ. 1991. Т.69. В.12. С. 172–173.
3. Баранов С.А., Зотов С.К., Ларин В.С., Торкунов А.В. Структура и свойства аморфного микропровода // Металловедение и термическая обработка металлов. 1992. № 9. С. 26–28.

4. Баранов С.А. Магнитные свойства аморфного микропровода в СВЧ диапазоне // ЖТФ. 1988. Т. 68. № 1. С. 136–137.
5. Ферромагнитный резонанс. (Сборник статей под ред. В.С. Вонсовского). М., 1961.

Поступила 05.09.2000

Summary

The internal stress in amorphous microwire is studied by the ferromagnetic resonance method. The internal stress decreases on a surface metal core.
